

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

ISSN 1728-3841

ЖТМ

2014 №3

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

2014 № 3

**ГОРНАЯ МЕХАНИКА
и машиностроение**



ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

№ 3 2014

Учредитель журнала:

ЗАО «Солигорский Институт проблем
ресурсосбережения с Опытным
производством»

Главный редактор
Щерба Владимир Яковлевич

Технический редактор
Барановский Анатолий Леонидович

Редакция:**Научно-технический журнал**

Издается с декабря 1998 г.

Выходит четыре раза в год

Журнал включен в Перечень научных
изданий ВАК Республики Беларусь

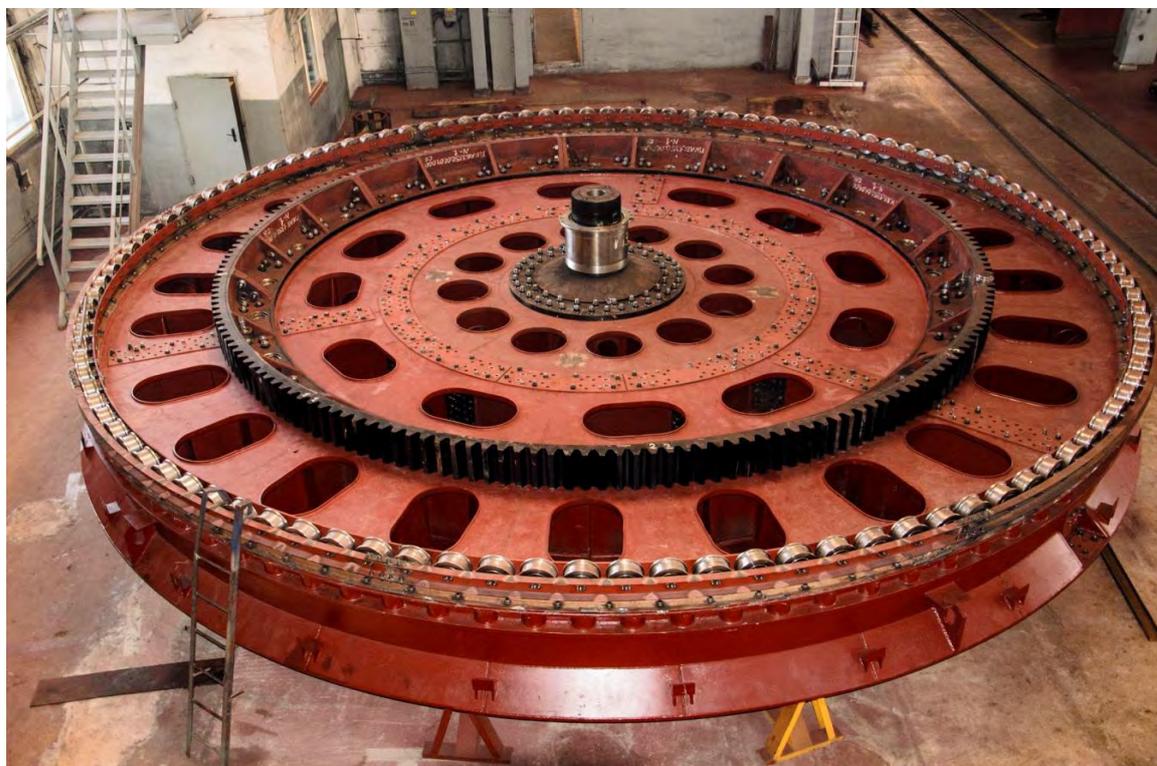
Заместитель главного редактора
Прушак Виктор Яковлевич

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

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

**Адрес редакции:**

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

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

- Журавков М.А.** Техногенные динамические события в регионах крупномасштабного освоения подземного пространства. Часть 3. Мониторинг техногенных динамических событий 5
- Головатый И.И., Петровский А.Б., Петровский Ю.Б., Прушак В.Я., Петровский Б.И., Поляков А.Л., Гарнишевский А.А.** Перспективные технологические схемы подготовки и отработки Третьего калийного пласта на шахтном поле Краснослободского рудника 24
- Иголка Д.А., Иголка Е.Ю., Лукша Е.М., Кологривко А.А.** Влияние температуры ледопородного ограждения при расчете крепи шахтных стволов 36
- Хлебко А.А., Шутин С.Г., Плескунов В.Н., Морев А.Б.** Совершенствование селективной выемки калийной руды на Старобинском месторождении 42
- Лесун Б.В.** Рациональное использование местных минеральных ресурсов 47
- Березовский С.Н., Лесун Б.В.** Оценка гранулометрического состава гравийно-песчаных месторождений Республики Беларусь и исследования теоретического распределения высоты уступов 56

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Богданович П.Н., Чернопяткин А.Е.** Разрушение трибосопряжений при циклическом нагружении 67
- Куземкин Д.М., Довгяло В.А.** Способы снижения динамических нагрузок в конструкциях ленточных конвейеров (обзор) 73

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Павленко А.П.** Композиционный материал на основе тарного стекла и алюмооксидной керамики 86
- Барановский К.Э., Урбанович Н.И., Волосатиков В.И., Басалай И.А., Розенберг Е.В., Дувалов П.Ю.** Износостойкость и механические свойства хромистых чугунов 96

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

Подписано в печать 02.09.2014 г.
Формат 60×84¹/₈. Бумага «Navigator», А4, 80 г/м². Заказ 2489. Усл. печ. л. 17,17. Тираж 120 экз.
Отпечатано Минским областным унитарным предприятием «Слуцкая укрупненная типография»
223610, Республика Беларусь, Минская область, г. Слуцк, ул. М. Богдановича, 7.
ЛП № 02330/0494181 от 03.04.2009 г.

MINE MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE-BUILDING

№ 3 2014

Scientific and Technical Journal

Published since December, 1998

Issued four times a year

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

Founder of the Journal:

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

Edition:

Editor-in-Chief

Shcherba Vladimir Yakovlevich

Editor-in-Chief Deputy

Prushak Viktor Yakovlevich

Technical Editor

Baranovsky Anatoly Leonidovich

Executive Secretary

Zayats Irina Mikhailovna

Editorial Board:

Andreiko S.S. – Ph.D., Professor

Bogdanovich P.N. – Ph.D., Professor

Danilov V.A. – Ph.D., Professor

Zhuravkov M.A. – Ph.D., Professor

Zubov V.P. – Ph.D., Professor

Kislov N.V. – Ph.D., Professor

Petrovsky B.I. – Ph.D.

Basinyak V.L. – Ph.D.

Brovka G.P. – Ph.D., Assist. Professor

Gubanov V.A. – Ph.D.

Zakharov Y.N. – Ph.D., Professor

Ivanov V.P. – Ph.D., Professor

Onika S.G. – Ph.D., Professor

Struck V.A. – Ph.D., Professor



Editorial Address:

The Republic of Belarus, 223710, Soligorsk, Kozlova Street, 69

Tel: (+375 174) 26 35 32, (+375 174) 28 21 07, Fax: (+375 174) 26 28 37

E-mail: ontiipr@tut.by

CONTENTS

GEOTECHNOLOGY

Zhuravkov M.A. Technogeneous dynamic events in the regions with a large-scale development of the mining area. Part III. Monitoring of technogeneous dynamic events...	5
Golovaty I.I., Petrovsky A.B., Petrovsky Yu.B., Prushak V.Ja., Petrovsky B.I., Polyakov A.L., Garnishevsky A.A. Long-term manufacturing schemes of the development and mining the Third potash seam in the mine field of the Krasnoslobodsky mine	24
Igolka D.A., Igolka E.Yu., Luksha E.M., Kologrivko A.A. Influence of an ice wall temperature at calculation of the shafts lining system	36
Khlebko A.A., Shutin S.G., Pleskunov V.N., Morev A.B. Improvement of selective mining of potassium ore in the Starobin deposit	42
Lesun B.V. Rational use of local mineral resources	47
Berezovsky S.N., Lesun B.V. Granulometric composition evaluation of the gravel-sand deposits of the Republic of Belarus and study of theoretical distribution of the benches height	56

MACHINE-BUILDING

Bogdanovich P.N., Chernopyatkin A.E. Tribounit destruction at cyclic loading	67
Kuzyomkin D.M., Dovgyalo V.A. Ways of dynamic load reduction in designs of belt conveyors (review)	73

MATERIALS ENGINEERING

Pavlenko A.P. Composite material based on container glass and alumina ceramics	86
Baranovsky K.E., Urbanovich N.I., Volosatikov V.I., Basalai I.A., Rozenberg E.V., Duvalov P.Yu. Wear resistance and mechanical properties of the chromic cast irons	96

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 550.348; 622; 539.3

**ТЕХНОГЕННЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ В РЕГИОНАХ
КРУПНОМАСШТАБНОГО ОСВОЕНИЯ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА****Часть 3. Мониторинг техногенных динамических событий**

Журавков М.А. (УО «Белорусский государственный университет», г. Минск, Беларусь)

Статья является продолжением первых двух частей серии, посвященной рассмотрению различных аспектов общей комплексной задачи изучения, моделирования и прогнозирования таких классов динамических процессов как техногенные землетрясения, динамические срывы, наведенные динамические явления, проявляющихся в массивах горных пород вследствие крупномасштабного освоения подземного пространства. В данной работе рассмотрены вопросы, касающиеся организации мониторинга динамических катастрофических событий.

Введение

Для прогноза таких опасных явлений как движения земной поверхности в районе геологических нарушений большой интенсивности и амплитуды весьма важно иметь в наличии технологии, позволяющие на основе экспериментальных исследований следить за изменениями характеристик напряженно-деформированного состояния (НДС) в породной толще, обусловленных техногенной деятельностью (разработка месторождений полезных ископаемых, строительство подземных инженерных крупных объектов и др.). В качестве исходных данных при проведении исследований и выполнении расчетов используются не только физико-механические свойства пород, но и временной режим деформирования, определяемый техногенным воздействием и естественными тектоническими процессами, существующими в регионе. Наиболее эффективным способом получения таких данных является построение комплексной системы наблюдений за поведением породного массива (*система геомеханического мониторинга*) [1, 2]. Основные принципы создания, внутренняя структура и наполнение систем геомеханического мониторинга подробно рассмотрены и изложены в большом количестве публикаций [2-4].

1 Некоторые общие сведения о системах геомеханического мониторинга

Основная роль систем геомеханического мониторинга в областях геологических нарушений заключается не столько в обеспечении конкретного прогноза, что ввиду сложности задачи представляется весьма проблематичным, сколько в обнаружении областей концентрации энергии в массивах горных пород и изучении процессов деформирования массива под воздействием инженерной деятельности по выемке и перемещению больших породных масс в процессе горных работ и действия тектонических сил.

При организации системы геомеханического мониторинга необходимо исходить из того, что такая система должна, в том числе, решать задачу изучения геомеханических процессов в породном массиве с подземными сооружениями с целью установле-

ния предвестников и прогноза катастрофических явлений в массивах горных пород (горных ударов, техногенных землетрясений, внезапных обрушений подработанных толщ и др.). Помимо этого система должна обеспечить контроль эффективности профилактических мероприятий по устранению опасности катастрофических явлений или снижению ущерба от них.

Структура системы геомеханического мониторинга определяется характером и назначением основных решаемых задач. Очевидно, что такая система должна быть комплексной, чтобы обеспечить регистрацию происходящих в массиве событий и процессов в широких кинематическом и динамическом диапазонах.

Необходимо отметить, что *формирование комплексной системы наблюдений должно происходить параллельно с разработкой геомеханической модели массива*, которая помимо всего определяет и необходимость использования тех или иных инструментальных методик и размещение в массиве соответствующих аппаратных блоков. С другой стороны, разработка модели возможна только на основе комплексных наблюдений за массивами горных пород, вмещающих сооружения.

Таким образом, основой систем геомеханического мониторинга является совместное использование натурных измерений и расчетов с использованием механико-математических и геомеханических моделей, адекватно описывающих деформирование и разрушение пород, слагающих массив. При этом расчетные методики должны применяться не только для прогнозного анализа и как основа для разработки критериев отбора информации, но и для выбора участков и масштабов измерений.

Так, в частности, при изучении разломов и крупных трещин необходимо выделять те из них, по которым возможны подвижки блоков массива, вызванные естественными или техногенными воздействиями. Такая задача может быть надежно решена только с помощью долговременных инструментальных наблюдений.

Система геомониторинга должна включать, как правило, несколько методик инструментальных измерений геомеханических характеристик, определяющих состояние массивов горных пород. Следует иметь в виду, что целесообразность использования той или иной методики на конкретном объекте обуславливается основными целями исследований и может быть установлена лишь путем выполнения специальных исследований. Методики должны быть объединены в единый комплекс, с автоматизацией процессов регистрации и обработки данных в реальном времени. Такой комплекс позволит решить не только задачу получения необходимых знаний о массиве и режиме его деформирования, но на основе создания банка данных и разработанных с помощью расчетов критериев обеспечить прогноз опасных и катастрофических ситуаций в процессе горных работ.

Полученные в результате инструментальных наблюдений данные должны выявлять особенности поведения массива, связанные с неоднородностью его строения. Проявление структурно-блочного строения массива при его деформировании эффективно регистрируется установкой сети датчиков. При этом необходимо добиться такого расположения сети, чтобы она охватывала ряд блоков различного масштаба. Так как структуру блочного строения массива можно выявить заранее лишь приближенно, указанная сеть должна быть достаточно густой и на первом поисковом этапе включать комплекс геологических и инструментальных исследований (геолого-структурный анализ, исследования с помощью дальномеров и нивелиров, измерения деформаций массива с помощью деформографов различных систем и наклономерных станций, установку сети сейсмоприемников для непрерывной регистрации сейсмических процессов в массиве и пр.).

Результаты геомеханического мониторинга геологической среды должны являться основой для принятия инженерных решений как технологического, так и эконо-

мического характера для того, чтобы свести к минимуму последствия проявления динамической структуры.

Актуальной задачей является *создание геомеханических и геодинамических полигонов на изучаемом участке породного массива (месторождения)*. По современным представлениям геодинамический полигон – это часть земной коры (месторождение или его часть), где осуществляется совместное изучение современных движений земной коры и геофизических полей с целью прогноза проявления структуры, для того, чтобы уметь различить природные и техногенные процессы в структурно-неоднородной среде на основе расчетных моделей развития деформационных процессов во времени и системы натурных наблюдений.

Важность организации комплексных долговременных инструментальных наблюдений на геодинамических полигонах в районах наличия разломов и областей геодинамической активности определяется, в частности, тем обстоятельством, что мониторинг относительных взаимных перемещений блоковых структур в районах геологических нарушений, особенно их амплитуды и скорости перемещений, и использование специальных методик, позволяют выполнить прогноз развития возможных динамических явлений на горизонтах ведения горных работ.

Отработка пластов до определенного «критического» объема может стимулировать активизацию деформационных процессов в породной толще, т.е. движение массива в районе разлома с большой амплитудой и высокой скоростью деформирования. С другой стороны, перемещения на земной поверхности, вызванные относительным движением блочных структур в области разлома, влекут за собой распространение деформационных процессов вглубь массива и могут послужить причиной появления критических деформаций водозащитной толщи (ВЗТ), особенно в суперпозиции с деформациями породной толщи вследствие ведения горных работ.

При исследовании поведения и прогнозе реакций конкретных разломов необходимо основываться на том, что изучение поведения разлома не может проводиться изолированно от общей геодинамической ситуации в районе месторождения – необходима постановка режимных наблюдений на большой площади. При этом натурные инструментальные наблюдения в комплексе с математическим моделированием должны быть поставлены в блоках массива, соседних с разломом в процессе приближения горных работ к разлому. Локализация разлома должна быть проведена до вскрытия разлома разведочной выработкой.

В случае пересечения разлома горными выработками поведение массива и разлома должно контролироваться в течение всего времени эксплуатации выработок путем непосредственного измерения перемещений берегов разлома и сопутствующих явлений (сеймики, вариаций геопотенциала и др.) в процессе развития горных работ и других техногенных воздействий.

При создании объединенных систем геомеханического и геофизического мониторингов важным представляется создание надлежащих теоретических и вычислительных основ, позволяющих взаимно дополнять эти подходы, устраняя их недостатки и объединяя достоинства [5-11].

Закономерности связи напряженного состояния и сейсмических событий совсем непросто определить, что весьма осложняет интерпретацию сейсмических данных в геомеханических терминах. Однако о существовании связи между наблюдавшимися сейсмическими и вызвавшими их изменениями напряженного состояния горных пород свидетельствуют результаты наблюдений на различных месторождениях [5].

Информативность сейсмических данных повышается, если использовать численное моделирование сейсмических событий. При численном моделировании в соот-

ветствии с законами и соотношениями механики сплошных сред (МСС) возникновение каждого события связано с изменениями НДС в массиве. Такая связь отслеживается в ходе расчета, так что одновременно имеется количественная информация об изменениях НДС пород в месте возникновения каждого из событий и об особенностях индивидуальных событий и их совокупностей, вызванных этими изменениями. Численное моделирование сейсмике углубляет понимание происходящих процессов, расширяет возможности интерпретации сейсмических данных и компенсирует недостаток информации о событиях в шахте [12, 13].

Сейсмическая модель представляет собой часть общей сопряженной геомеханической модели, которая строится в соответствии с особенностями горно-геологической и горнотехнической ситуации рассматриваемого участка. Настройка сейсмической части модели выполняется путем надлежащего выбора параметров начальных дефектов – трещин, распределенных в области влияния горных работ.

Приведенный в работе [5] пример показывает, что совместное использование данных шахтных микросейсмических наблюдений, расчетов НДС и моделирования сейсмических событий позволяет углубить понимание процессов, происходящих в конкретной шахте, улучшить интерпретацию сейсмической информации и повысить надежность практических рекомендаций.

Обработка данных наблюдений и численного моделирования показала, что распределение области рассеяния сейсмических событий полностью согласуется с зонами повышенного горного давления. Поэтому дополнение сейсмических данных результатами расчетов напряжений дает количественную оценку зон повышенного горного давления. При этом обнаруживаются и те части опасных зон, в которых сейсмическая активность невелика, но в которых имеются высокие напряжения, близкие к гидростатическим.

Дополнение результатов наблюдений и расчетов напряжений численным моделированием сейсмических событий, с одной стороны, устанавливает количественную связь между сейсмикой и изменениями напряженного состояния, а с другой – дает информацию об ориентации плоскостей событий, их типе, сейсмическом моменте, сдвигах, а также расширяет статистическую базу для анализа сейсмических событий. Последнее позволяет, в частности, количественно оценивать опасность динамических явлений вблизи забоя при его продвижении, например, за сутки, тогда как обычные шахтные наблюдения дают статистически значимую информацию за гораздо больший интервал времени (месяц, квартал).

Диагностика напряженного состояния массивов горных пород в общем случае включает выполнение последовательности нескольких этапов, среди которых, например, и следующие [14].

1. Картирование исследуемой области по современным деформациям и выделение зон с наибольшим градиентом современных вертикальных и горизонтальных движений блоковых структур. Выделение границ таких структур по отношению к контурам месторождения или участкам возведения соответствующих инженерных объектов.

2. Разделение месторождения на участки по их расположению относительно элементов рельефа и блочной структуры породного массива.

3. Дифференцирование месторождения по прочности, упругости и трещиноватости пород.

4. Предварительная оценка направления главных напряжений по преимущественному развитию систем разрывных и сколовых нарушений, а также по параметрам геофизических, главным образом – сейсмических полей.

5. Оценка в первом приближении величины и направления главных напряжений по данным геологоразведочного бурения, дискованию керна, изменению формы попе-

речного сечения скважин, искривлению стволов скважин, по разрушению горных выработок.

6. Измерение параметров напряженного состояния пород в массиве инструментальными методами (гидроразрыв, методы разгрузки, ультразвуковой, сейсмический).

Оценка параметров полей напряжений должна производиться комплексом методов от простейших к сложным инструментальным определениям с постепенным наращиванием информации, что обеспечивает надежность и репрезентативность получаемых результатов.

На основе информации о напряженном состоянии пород в массиве и их физических свойствах намечается основная стратегия ведения горных работ. Так на участках с высоким уровнем напряженного состояния, являющихся наиболее потенциально опасными относительно возможности проявления динамических явлений, управление горным давлением сводится к устранению или минимизации концентрации напряжений в районе ведения горных работ, либо к снижению способности приконтурного массива накапливать критические запасы потенциальной энергии упругого деформирования. Например, установлено [14], что при напряжениях в нетронутом массиве пород меньших $0,25\sigma_c$ (σ_c – прочность пород при одноосном сжатии) разгрузочная щель в кровле выработки не должна отставать от забоя более чем на диаметр выработки. При напряжениях $(0,25-0,4)\sigma_c$ щель должна постоянно находиться на уровне груди забоя, а при напряжениях, превышающих $0,4\sigma_c$, щель должна создаваться одновременно в кровле и забое выработки и опережать забой не менее чем на половину диаметра выработки.

Следует подчеркнуть, что сочетание геофизического и геомеханического мониторинга в настоящее время в большинстве своем обеспечено в научном, вычислительном и практическом отношениях. На шахтах и рудниках, имеющих в своем составе службы геофизических и/или геомеханических наблюдений, создание таких систем не требует существенных дополнительных затрат.

2 О достоверности прогноза динамических явлений большой интенсивности

Если изучить всевозможные публикации, касающиеся проблемы предсказания и прогноза разнообразных динамических явлений в массивах горных пород, то логичным представляется *постановка вопроса о принципиальной возможности разработки достоверных прогностических методов и методик*. К рассматриваемой проблеме можно в настоящее время в полной мере применить аргументы и положения, сформулированные, например, в работе [15]:

- в настоящее время *высокоточный прогноз невозможен* вследствие хаотической, многовариантной и нелинейной природы процессов подготовки динамических процессов;

- породная толща находится в состоянии самоорганизованной критичности (хаоса), не имеющей характерных размеров, и, следовательно, *оценка места, времени и силы динамических явлений может быть только статистической*, но не детерминированной;

- динамическим явлениям присуща непредсказуемость, поэтому *парадигма*, в соответствии с которой *данному физическому явлению, реализующему огромную энергию, должны в обязательном порядке предшествовать идентифицируемые и наблюдаемые предвестники, является неверной*;

- даже наиболее развитые в настоящее время *методы, базирующиеся на физической регистрации предвестников динамических явлений, не могут объяснить даже 50 % всех имеющих место явлений*;

- *единой физической основы прогноза индивидуального явления не существует*.

Следует подчеркнуть, что приведенные положения говорят не о невозможности прогноза, а о сложности и слабой изученности рассматриваемого явления.

Поэтому (и это главное), **прикладная прогностическая задача должна включать в себя комплексные исследования, рассматривая все возможные механизмы развития физического процесса.**

Согласно концепции самоорганизованной сейсмичности [16], геологическая среда является открытой динамической самоорганизующей системой, в которой одновременно протекают два процесса: накопление упругой энергии деформирования за счет внутренних (технологических) и внешних (тектонических) источников, а также диссипация (скачкообразное уменьшение) этой энергии путем сдвигов и техногенной сейсмичности. Крупные структурные блоки в этой системе – участки, в которых скорость накопления энергии опережает скорость ее диссипации [17]. *На границе данных энергонасыщенных участков и происходят динамические явления (например, горные удары).* По времени такие процессы приурочены, главным образом, к явлениям естественного или техногенного характера большой интенсивности (например, массовым взрывам, обрушениям), которые исполняют роль «спускового крючка». Поэтому представляется весьма важным выявить эти энергонасыщенные зоны для разработки безопасных мероприятий, препятствующих или предотвращающих возникновение катастрофических динамических явлений.

Индикатором притока упругой энергии деформирования [17] служат сейсмособытия, зарегистрированные на достаточном удалении (более 100 м) от эпицентра расположения события, являющегося «спусковым крючком» в период отработки рассматриваемого блока, а также блоков, отработанных непосредственно перед проявлением «спускового крючка» в изучаемом блоке.

Важной характеристикой энергонасыщенного участка является количество n сейсмособытий [17], расположенных, по крайней мере, в 100-метровой окрестности центра разрабатываемого блока. Если на стадии разработки блока известно распределение N событий, среди которых $N - n$ событий, зарегистрированных на достаточном удалении (более 100 м) от эпицентра «спускового крючка», гораздо больше n , то можно с достаточной достоверностью говорить об энергонасыщенном участке и высокой удароопасности разрабатываемого блока [17]. Поэтому можно рассматривать вероятность P динамического катастрофического явления как отношение числа явлений, зарегистрированных вне 100-метровой окрестности, к их общему количеству [17]: $P = (N - n)/N$. Если $P > 0,9$, то катастрофическое явление становится достоверным и необходимо принимать меры по приведению массива в неудароопасное состояние [17].

Таким образом, анализ пространственного распределения сейсмособытий позволяет выявить участки концентрации эпицентров, ограничивающие структурный блок ненарушенной среды. Расчет вероятности возникновения катастрофического динамического явления показывает: какова возможность превращения структурного блока, проявившегося до проведения горных работ, в очаговую зону динамического явления после интенсивных горных работ.

В деформационных моделях в качестве предвестников землетрясений главным образом рассматриваются результаты наблюдений за медленными движениями точек земной коры. В результате тектонических движений возникают касательные напряжения, из-за которых появляется объемная дилатансия, захватывающая горизонтальные размеры, намного превосходящие размеры очага землетрясения. В работе [18] описаны эксперименты, показывающие, что подъем и наклон профиля дневной поверхности за счет неравномерности вертикальной составляющей дилатансии может быть мерой накопления потенциальной энергии при подготовке землетрясения во время медленного

скольжения по плоскости разрыва. Максимальный скачок и динамика неустойчивого скольжения пластины возникает в момент преодоления точки пиковой прочности на диаграмме деформирования материала «касательные напряжения – смещения».

Сделаем некоторые замечания относительно фактора «время» в задачах исследования динамических явлений. В данной проблеме можно выделить задачи «*обобщенного предсказания*», «*прогноз среднесрочного масштаба времени*» и «*краткосрочный прогноз*».

Задача «обобщенного предсказания» при всей ее научной значимости не обладает в достаточной степени практической конкретностью. Так, например, утвердительный ответ на вопрос о возможности возникновения в рассматриваемых горно-геологических и горнотехнических условиях динамического явления без указания более точных и конкретных параметров и характеристик не представляет практического интереса.

«Прогноз среднесрочного масштаба времени» имеет своей целью выдачу предупреждения о динамическом явлении за некоторое время, поэтому обладает практической конкретностью. В большинстве своем такой прогноз предполагает моделирование сценария развития процесса разрушения по данным текущих наблюдений. Поэтому актуальной является проблема надежной идентификации возмущений, регистрируемых аппаратурой, так как возмущения являются отражением неопределенностей и флуктуаций различной природы, а не только предвестниками изучаемого явления.

Исследование краткосрочных предвестников основано на том, что, как известно, заключительная фаза геодинамического события характеризуется резкой активизацией процесса изменения напряженно-деформированного состояния массива. Скорости деформаций во всей области подготовки события возрастают на порядки, поэтому информация относительно надвигающегося разрушения становится более доступна для контроля по комплексу геофизических событий. В этот период процесс в наибольшей степени приобретает свойство необратимости и имеет лавинообразный характер нарастания.

С учетом изложенного, при рассмотрении динамических срывов и крайней формы их проявления – техногенных землетрясений – как физических процессов необходимо отталкиваться от исходного положения, что эти явления представляют собой случайные процессы. Данное утверждение основывается, например, на том, что невозможно иметь полную информацию о состоянии породной толщи, о развитии процессов, обусловивших исходные предпосылки к возникновению этих явлений, и о внешних факторах, способствовавших их реализации. То есть динамические срывы являются следствием чрезвычайно сложных и многообразных исходных детерминированных процессов, происходящих в породной толще и имеющих как естественное, так и техногенное происхождение. Случайный характер динамических срывов определяется лишь ограниченностью знаний о природе всех явлений, предшествующих срывам.

В связи с вышесказанным, *к проблеме построения научно-обоснованной системы точного прогноза динамических срывов можно подойти с двух точек зрения* [19].

Первая точка зрения заключается в том, что в связи с чрезвычайно сложным и скрытым характером и многообразием явлений, предшествующих динамическим срывам, а также ограниченностью средств получения и обработки значительного объема информации, имеющей отношение ко всем циклам исследуемого явления, возможность реализации детерминированного прогноза явления практически отсутствует. В сложившихся на сегодня условиях наиболее приемлемым является вероятностная трактовка собственно самих событий динамических срывов и построение вероятностной системы их прогноза.

Иная точка зрения состоит в том, что задача прогноза динамических срывов рассматривается как задача предсказаний последовательности закономерных, детерми-

нированных событий, которые могут произойти в не очень отдаленные времена в заданной области породного массива с указанием времени их осуществления, либо даже с указанием координат и в пространстве, и во времени с практически приемлемой точностью. Возможность такого подхода обуславливается следующими обстоятельствами:

- время протекания собственно процесса динамического срыва значительно меньше времени его подготовительного развития (подготовки состояния среды к проявлению динамических процессов);
- процессы подготовки и собственно динамического срыва являются многокомпонентными явлениями (наиболее значимая и опасная компонента комплексного явления – катастрофические механические перемещения областей массива);
- динамические срывы приурочены к определенным зонам в породной толще (будем их называть очаги динамических срывов), характеризующимся накоплением избыточной внутренней потенциальной энергии;
- процесс развития очага динамического срыва сопровождается развитием и распространением в породной толще (или в окружающую среду) пространственно совмещенных с очагом областей аномальной эмиссии различных геофизических полей и зон аномальной геохимической активности;
- этапу собственно динамического срыва, как кратковременному процессу макроразрушений определенных участков породного массива, предшествуют значительно более длительные этапы проявления потенциально опасной активности очага динамического срыва в различных геофизических полях и геохимических процессах, при этом различные этапы становления и развития очага динамического срыва имеют временной характер проявления и связаны с определенным видом и характером излучения геофизических полей.

Второй подход, по-видимому, является более привлекательным в плане создания специального комплекса мониторинговых наблюдений, обеспечивающего детерминированный ближний (в пределах разумного достаточного для принятия решений периода времени) прогноз динамических срывов. Основной целью организации системы таких мониторинговых наблюдений является возможность выявления характеристик породного массива и существенных признаков, исследование явлений различной природы. Все перечисленное в своей совокупности с максимальной информативностью охватывает наиболее существенные стороны и этапы развития процессов, подготавливающих динамический срыв и приводящих к нему. Например, одни из характеристик несут информацию о накоплении энергии в массиве, другие – о макроподвижках и макроперемещениях, третьи – о факторах, инициирующих разрушение и/или ускоряющих процесс разрушения (разрыва), и определяющих его место (гипоцентр) и время, четвертые – о наиболее вероятных путях выхода разрушительных деформаций и т.д.

Одно из неперемных требований к надежной системе прогноза состоит в том, что она должна опираться на максимально широкий комплекс значимых геолого-геофизических признаков и явлений. Выявление информативных геолого-геофизических явлений, сопровождающих зарождение, развитие и вскрытие очага динамического срыва, выполняется на основе анализа и учета как можно более полного комплекса явлений, приводящих к срыву, и на базе фундаментальных представлений о геофизике, геомеханике и геологии очага явления.

Помимо этого, при включении в число значимых каждого из признаков следует руководствоваться следующим правилом: необходимо четко представлять себе, что измеряем, как измеряем и где измеряем. Данное правило позволяет обеспечить действительное информационное проникновение в исследуемую проблему, а не является «околопроблемной» деятельностью.

В большинстве своем зона динамического срыва отличается по своим физическим параметрам и характеристикам от вмещающих пород. При накоплении энергии и возникновении повышенного напряженного состояния данная зона может излучать энергию. Поэтому, по различным физическим полям (сейсмическим, электромагнитным, гравитационным и др.) можно картировать зоны динамических срывов, а по их изменениям в специально выбранных местах и комплексно-сравнительной обработке данных – судить о надвигающихся событиях.

Рассмотрим динамические срывы, приуроченные к протяженным геологическим нарушениям типа разломов. Среди разведочных методов при изучении возможности возникновения очаговых зон динамических срывов, приуроченных к разломам, ведущая роль принадлежит сейсмическим методам, и, прежде всего, глубинному сейсмическому зондированию. *Поисковыми методами* являются дистанционные методы: спутниковые, аэрогеофизические и наземные с подвижных носителей, реже – пешеходные, маршрутные и площадные.

Картирование региональных неоднородностей земной коры, предположительно связанных с потенциальными зонами возникновения динамических срывов, выполняется наиболее доступными методами магниторазведки, электроразведки, гравиразведки, тепловидения, аэрофотосъемки и др. На малых высотах основными методами являются электроразведка и аэрогаммаспектрометрия.

Является известным теоретический и экспериментально установленный факт о том, что электромагнитная, сейсмическая, акустическая, тепловая энергия в неоднородных средах зачастую переносится без существенных потерь на значительные расстояния (неизмеримо превышающие расстояния равноценного переноса этих полей в однородных средах) от их источников по некоторым выделенным направлениям и путям. Частным случаем такого избирательного распространения волновых полей в неоднородных средах являются волноводы. Например, активные разломы за счет сейсмоакустической и электромагнитной эмиссии создают особые условия для распространения по вертикали акустических и электромагнитных волн над разломом. Поэтому задача прогноза динамических срывов, приуроченных к разломам, частично сводится к задаче поиска волноводов, по которым поступает к наблюдателю информация об объекте.

Замечание. Волновод можно определить как явление аномальной концентрации и избирательного распространения волновых полей без заметных энергетических потерь на значительные расстояния. Этот эффект характерен именно для неоднородных сред и не наблюдается в однородном случае. Но и неоднородная среда должна иметь соответствующее «благоприятное» строение, чтобы в ней могли возникать и протекать волновые процессы. Существование в среде выделенных областей с повышенной плотностью волновой энергии и преимущественными условиями распространения волн (волноводов) влечет за собой наличие в среде областей с пониженной плотностью энергии – «теневых» зон для рассматриваемого волнового поля.

Итак, неперенным условием определения верной стратегии управления горным давлением является наличие надежной информации о параметрах поля напряжений в массивах горных пород. Для получения такой информации необходимо внедрение комплексной системы геомеханического мониторинга для прогноза напряженно-деформированного состояния пород в массиве от стадии геологоразведочных работ до этапов разработки и освоения месторождения.

3 Сейсмический мониторинг

Множество исследовательских групп, лабораторий, институтов проводили и продолжают выполнять исследования, направленные на поиск надежного предвестника

(сигнала), который бы точно указал, где будет находиться эпицентр динамического явления, и когда произойдет основной удар, особенно если это касается таких катастрофических динамических явлений, как горные удары, землетрясения. Многие исследователи и сегодня сомневаются, что такой «сигнал» существует. Хотя в настоящее время, например, уже разработаны методики, позволяющие в первые секунды, когда только начинается едва уловимое движение, с определенной достоверностью предсказать, как далеко распространится землетрясение и насколько сильным оно будет. Этим несколько десятков секунд (до полминуты) достаточно, чтобы, используя достижения науки и современные средства связи, предупредить тех, кто находится в опасности.

На сегодня одним из наиболее информативных натуральных методов контроля НДС геологической среды является сейсмический, основанный на регистрации и анализе параметров упругих колебаний, возбуждаемых процессом хрупкого разрушения массива пород [20]. При этом, изучается число разрывов в единицу времени, их пространственное распределение, энергия упругих импульсов и их частотный спектр, и другие статистические параметры сейсмического режима. Сейсмический метод обладает рядом принципиальных достоинств. Так, в частности, он обеспечивает [20]: получение интегральной характеристики состояния массива, учитывающей действующие напряжения и уровень опасности динамических событий; изучение физических процессов в очаге и механизмов динамических явлений; регистрацию информации о состоянии значительного участка обрабатываемого месторождения небольшим числом пунктов регистрации, радиус реальной чувствительности которых составляет сотни метров и др.

Использование классических сейсмологических методов для геодинамического мониторинга обусловлено тем, что события, предшествующие техногенным землетрясениям, по условиям возникновения и по проявлениям наиболее близки к аналогичным процессам, предваряющим и сопровождающим тектонические землетрясения [21].

В число наиболее современных и развитых автоматизированных систем контроля сейсмичности массивов горных пород в России на сегодня входит система, используемая на Хибинских апатитовых рудниках [21], предназначенная для контроля геомеханических процессов в геологической среде с целью обеспечения устойчивости выработок и снижения геодинамических рисков.

Опыт использования отдельных критериев для выделения сейсмоактивных зон и прогноза сильных сейсмических событий в условиях Хибинского массива показал, что эффективность прогноза в соответствии с методиками, базирующимися на данных, полученных по отдельным прогностическим показателям, незначительна [20]. Для повышения вероятности прогноза целесообразен совместный анализ отдельных критериев, для чего необходимо использовать методику комплексной оценки сейсмического режима [22].

Системы заблаговременного оповещения о землетрясениях должны обнаруживать первое слабое дрожание основного сотрясения, запуская систему предупреждения до прихода самого разрушительного толчка. Так, например [23], система ShakeAlert, предложенная в Калифорнии, использует сеть цифровых сейсмометров, развернутую по территории всего штата, чтобы дать населенным районам до минуты времени на предупреждающий сигнал (зависит от местонахождения от эпицентра). Сигналы должны обеспечить предприятиям, жителям и общественным организациям время на подготовку.

В настоящее время во всем мире установлены пять наиболее крупных систем заблаговременного оповещения о землетрясениях, каждая приспособлена к рельефу местности, в которой она находится [23]. В Мексике датчики, регистрируя с тихоокеанского побережья землетрясения, которые зарождаются вдали, в зоне субдукции, отправляют сигнал тревоги в Мехико, построенном на илистом грунте, усиливающим

трясение. Подобным образом румынская система предназначена для обеспечения Бухареста ранним предупреждением о землетрясениях, которые происходят за 150 км в юго-восточной части Карпатских гор. Япония подвержена землетрясениям повсеместно. После землетрясения в 1995 г. в Кобе, когда погибли более 6 тыс. человек, было установлено более 2 тыс. сейсмических станций, чтобы охватить всю страну. Сегодня это самая совершенная в мире система предупреждения о землетрясениях. В японской системе, запущенной в 2007 г., широко используется персональная техника. Такие объекты, как атомные станции, железные дороги, аэропорты и уязвимые промышленные предприятия, снабжены специальными средствами связи, приспособленными для их нужд.

На планете ежедневно происходят сотни землетрясений. Большинство из них столь слабы, что о них можно узнать, только если в наличии имеются чувствительные сейсмометры. При каждодневных землетрясениях смещение масс земной коры происходит по плоскости тектонического разлома на участках 1-2 м, при этом человек может не ощущать сотрясения земли. При землетрясении магнитудой 5,0 разрыв распространяется на 1,5-2,5 км по плоскости разлома, и человек будет ощущать движение земли, но современные постройки могут выстоять. При магнитуде 8,0 разрыв идет на сотни километров по плоскости разлома, может достичь поверхности Земли и расколоть здание пополам.

Земная кора очень эластична, но только до определенной степени. По краям плит земная кора прогибается до тех пор, пока натяжение не станет чересчур велико. Когда оно становится слишком большим, накопленная предшествующими десятилетиями энергия прорывается сквозь толщу на поверхность Земли, сокрушая все на своем пути.

Общеизвестным является факт, что во многих районах земная кора близка к предельному состоянию (разрушению). Особенности геологического строения разлома в глубинах Земли также играют важную роль в образовании и распространении разрывных нарушений, однако отобрать образцы непосредственно из области нарушения практически не представляется возможным. Поэтому большинство исследователей полагают, что создать систему, позволяющую прогнозировать день и час мощного землетрясения, наверное, нереально. Все, что можно сделать в обозримом будущем – это распознать его в самом начале и послать сигнал тревоги. Выполнению данной задачи помогает знание нескольких особенностей землетрясений.

То, что воспринимается как один продолжительный толчок, на самом деле происходит этапами [23]. Энергия от разрыва земной коры проходит сквозь толщу земли в виде *P*-волн и *S*-волн. Таким образом, во всех землетрясениях участвуют два вида волн. Оба вида волн начинают распространяться от поверхности разлома в одно и то же время, но на этом их сходство заканчивается.

P-волна (продольная, волна сжатия) – первичная волна, сжимает массы земной коры по мере продвижения, как и звуковая волна. Она распространяется достаточно быстро, но не вызывает больших разрушений, так как не несет большого количества энергии. Во время землетрясения *P*-волны ощущаются как внезапный вертикальный удар. Следующая за *P*-волной *S*-волна (поперечная, вторичная волна) прогибает пласты горных пород вверх и вниз, как океаническая волна. Таким образом, *S*-волна движется медленно, но содержит большую часть энергии и вызывает самое сильное сотрясение. Происходит горизонтальное и вертикальное движение масс поверхности Земли. Такие волны могут с легкостью разрушить строения.

Помимо упомянутого, волны имеют различные очертания в зависимости от размеров участка смещения. Если он невелик, то *P*-волна имеет относительно малую амплитуду и высокую частоту, т.е. слабый, но учащенный пульс. При более сильных землетря-

сениях разрыв происходит на большей площади разлома и отличается большим смещением, соответственно, P -волна расходится с большей амплитудой и более низкой частотой.

Сильные землетрясения выявляются в системах предупреждения по очертанию P -волны. Небольшие сотрясения имеют слабый, учащенный пульс, а крупные заявляют о себе высокой амплитудой и низкой частотой удара [23].

Исходя только из этих данных, можно предположить, что отдельный сейсмометр мог бы рассчитать магнитуду землетрясения. Действительно, любая P -волна с большой амплитудой и низкой частотой могла бы вызвать сигнал тревоги. И такой путь, когда только одна станция оповещает об опасности вблизи эпицентра, самый быстрый. Однако характер разрывных движений различен, не все землетрясения магнитудой 5,0 выглядят одинаково. P -волна видоизменяется в зависимости от особенностей осадочных пород, залегающих там, где расположен сейсмограф. При подобной изменчивости велик риск получить ложный сигнал (после которого ничего не произойдет) или пропустить его, и тогда стихия нанесет удар без предупреждения.

Совместив данные с нескольких сейсмографов, расположенных на расстоянии нескольких километров, можно снизить вероятность регистрации ложного и неполучения нужного сигналов [23]. В этом случае подстилающие осадочные породы в месте нахождения каждого из сейсмометров будут различными, что даст возможность получить среднюю расчетную величину магнитуды. Таким образом, в системах заблаговременного оповещения собираются данные с разветвленной сети сейсмических станций для уточнения сильных ударов и определения эпицентра. Затем посылается электронный сигнал тревоги, опережающий S -волну. Чем больше станций зарегистрируют землетрясение, тем точнее будут предопределены магнитуда и эпицентр. Но при таком подходе (использование сейсмической сети) все данные измерений посылаются в центр для обработки. Для передачи и анализа данных потребуется несколько секунд, но каждую секунду разрушительная S -волна проходит 3-5 км.

Поэтому лучший выход – это сочетание обоих подходов: использование данных, как одиночного сейсмометра, так и всей сети, что дает возможность оперативно получить информацию об эпицентре землетрясения. В каждом случае необходимо искать компромиссное решение, выбирая между точностью или временем оповещения. Поскольку в сейсмической сети собирается больше данных по землетрясению, то прогнозы будут точнее, но определяемый промежуток времени до прихода толчков сократиться. В некоторых случаях более важным представляется выиграть время. Поэтому в этой ситуации существенны и ложные сигналы. Так, например, в зданиях с большим количеством населения желательно получить предупреждающий сигнал заранее, чтобы успеть эвакуировать людей. В то же время на атомных станциях для остановки реактора требуется всего лишь одна секунда. Но это очень дорогостоящая операция, поэтому в этом случае лучше ждать точного подтверждения опасности, чем опираться на ложный сигнал.

Большая часть сейсмических событий классифицируется автоматически с использованием компьютерных алгоритмов, и только в сложных случаях программа дает знак, что требуется вмешательство человека. Специалисты уже много лет регистрируют землетрясения и взрывы в шахтах, и теперь хорошо знают, как характеристики таких событий отражаются в записанных сейсмических сигналах. Хотя бывают и ошибочные заключения. Так, например [24], интерпретация данных катастроф, имевших место в шахтах в Германии и России в 1989 г., в США в 1995 г., сейсмическими станциями была не вполне однозначной, так как на больших расстояниях от источника классические методы идентификации сейсмических событий привели к ошибочной интерпретации данных событий как подземных взрывов. Классические методы идентификации основаны на сравнении силы длинноволновых поверхностных (поперечных) ко-

лебаний с продольными колебаниями, распространяющимися по глубоким внутренним структурам планеты. Например, при неглубоком землетрясении и при подземном взрыве могут возникнуть продольные колебания одинаковой силы, однако поверхностные колебания от землетрясения будут значительно сильнее, чем при подземном взрыве.

4 Предвестники геомеханических катастроф

Проблема выявления надежных признаков наступающего катастрофического события является актуальной задачей в исследовании эволюционно-катастрофического поведения системы. Применительно к рассматриваемым процессам можно, например, констатировать, что *если математическую модель, описывающую механизм места возможного проявления динамического явления и его тип, можно в принципе построить, то когда такое событие произойдет и будет ли оно вообще иметь место – установить крайне сложно.*

Очевидно, что такой параметр риска возникновения опасного явления, как время существования потенциальной опасности его возникновения (или время уменьшения) неразрывно взаимосвязан с пространственным масштабом зоны распространения предельного (в соответствии с определенными критериями) НДС и, следовательно, с масштабами ожидаемых существенных смещений и деформаций породной толщи.

Так, если речь идет о прогнозировании динамических явлений (горных ударов) в окрестности выработок, при которых происходит разрушение только приконтурной зоны и выбросы отдельных блоков породы в выработанное пространство, то наибольшая опасность будет существовать в течение сравнительно коротких промежутков времени, сравнимых с периодом техногенного вмешательства (проходки выработки). При этом горный удар такого масштаба может быть вызван сравнительно незначительными внешними воздействиями (например, сейсмическое воздействие от удаленных горно-проходческих работ).

В последние годы значительное внимание уделяется сейсмическим методам, способным фиксировать изменения поля упругих колебаний в процессе движений больших участков породной толщи (к таковым относятся, например, обрушение бортов карьеров, формирование оползней, подвижки в районе разломов и др.). Данное обстоятельство обусловлено тем, что *моменту нарушения сплошности среды обычно предшествует снижение скоростей упругих волн* [25]. Это в некоторых случаях объясняется, например, появлением максимальных растягивающих деформаций с наибольшим диапазоном изменения сейсмических характеристик в пределах зон разрушения горного массива.

Более того, как указывается в работе [26], многочисленными исследованиями установлен факт того, что *с увеличением амплитуды деформации скорость упругих волн в породной толще всегда уменьшается, а их затухание увеличивается.* Так, в [27] описано нелинейное поведение песчаников в виде уменьшения скорости продольных волн V_p и увеличения декремента затухания Q_p^{-1} , начиная с амплитуды деформации $\varepsilon > 10^{-6}$. Скорость волны реагирует на изменение амплитуды незначительно (не выше 1 % в рассматриваемом амплитудном диапазоне), но затухание изменяется в несколько раз больше. Амплитудная зависимость декремента затухания аналогичного типа была также получена с использованием резонансного метода [28-31].

Теоретическое обоснование явлению уменьшения скорости упругих волн в период нарушения сплошности массива выполнено В.А. Дубровским и В.Н. Сергеевым [32]. Установлено [33-35], что если система имеет при некотором наборе характеризующих ее критических параметров положение неустойчивого равновесия, разделяющего области значений параметров, соответствующих устойчивому и неустойчивому состоянию сис-

темы, то в устойчивой области при внешнем воздействии будут возникать волны, частота которых должна стремиться к нулю по мере приближения системы к критическому положению неустойчивого равновесия при конечных размерах волновых возмущений. Следовательно, при эволюционном приближении системы к положению неустойчивого равновесия, за которым следует катастрофический переход в другое эволюционное состояние, система должна испытывать собственные колебания понижающейся (практически до нуля) частоты по мере подхода системы к катастрофическому порогу (положению неустойчивого равновесия). Важный вывод, следующий из данного принципа, состоит в том, что [32] *любая катастрофа должна предваряться медленными волновыми изменениями некоторых характеризующих состояние системы параметров. Частота этих собственных волновых движений очага неустойчивости стремится к нулю по мере приближения к порогу неустойчивости – катастрофе.*

В литературе имеются примеры поведения систем, соответствующие описанному принципу (например, [34-38]). Наблюдения подтверждают этот факт [39, 40], как явление, предшествующее землетрясению и указывающее на приближение последнего. Изучение сейсмичности перед сильными землетрясениями Камчатки, выявило сдвиг максимума спектра сейсмичности в низкочастотную область [39]. То же самое подтверждают наблюдения колебания уровня водной поверхности (сейш) Черного моря [40].

Отмеченная специфическая волновая природа признаков, предвещающих катастрофу, с непрерывным уменьшением их частоты была замечена при исследованиях процесса подготовки землетрясений. Описанный прогностический признак по существу должен проявляться всегда, поскольку он является неотъемлемым элементом эволюции очага землетрясения в направлении порога неустойчивости.

Более того, обсуждаемый волновой деформационный процесс, предвещающий землетрясение, может инициировать другие замеченные ранее признаки различной физической природы, например: повышение уровня радона, изменение уровня воды в скважинах как следствие изменения проницаемости коры при ее периодической деформации или электрические и электромагнитные явления в атмосфере и ионосфере [41], которые могут быть результатом работы электродинамического и электроупругого механизма генерации электрического поля и, следовательно, электромагнитного излучения [42].

Таким образом, можно предположить, что *аналогичный эффект уменьшения частоты сейсмоакустического фона наблюдается так же перед горными ударами в шахтах и перед разрушением сплошности твердого тела при образовании и развитии магистральной трещины.*

Обобщение многочисленных теоретических и экспериментальных данных по влиянию амплитуды на скорость волны для различного типа песчаников подтвердило, что модуль Юнга всегда уменьшается с увеличением амплитуды [43]. Однако в дальнейшем появились теории, которые показывают возможность не только снижения, но и роста динамического модуля Юнга с изменением амплитуды деформации [44-46].

Имеются экспериментальные доказательства того, что *скорость волны носит дуальный характер*, поэтому увеличение скорости волны с повышением деформации – реальный факт [47]. Это подтверждают и натурные измерения при распространении сейсмического импульса частотой 500 Гц в приповерхностном грунте, которые показали увеличение V_p с возрастанием амплитуды [48]. Наиболее интересные результаты, позволившие существенно продвинуться в решении этой проблемы, получены при изучении амплитудной зависимости волнового затухания. Выявлено, что декремент затухания может не только увеличиваться, но и уменьшаться с возрастанием амплитуды деформации [26]. Обнаружены релаксационные пики затухания, параметры которых зависят от величины деформации [26, 49]. Установлено существенное различие пара-

метров релаксационного пика для сухой и водонасыщенной породы [50], что позволит повысить эффективность метода диагностики пород-коллекторов.

В работе [26] установлено, что затухание имеет максимум в определенном диапазоне деформаций, т.е. как увеличивается, так и уменьшается при изменении амплитуды. Такое поведение затухания не вписывается в обычные нелинейные теории, поэтому для объяснения этих эффектов требуется привлечение нескольких физических механизмов. Уменьшение и увеличение декремента затухания, вызванное изменением величины амплитуды деформации, по существу означает изменение величины добротности горной породы при распространении механического сигнала малой интенсивности. Выявленные изменения скоростей волн были не столь существенными по сравнению с затуханием [26]. Однако этот факт также свидетельствует об изменении модуля упругости горной породы, вызванной той же самой причиной. Можно предположить, что в слабо консолидированных породах амплитудно-зависимый эффект для модуля упругости будет проявляться сильнее и появятся предпосылки для его прикладного использования. Например, в верхней части геологического разреза или в почве за счет низкого модуля упругости обнаружено значительное изменение скоростей волн (модулей) под действием переменной динамической нагрузки [51]. Этот эффект можно использовать как показатель остаточных явлений в почве, ее насыщенности и др.

Экспериментально установленный факт, что одинаковое изменение скорости волны может быть получено как за счет высокого статического давления, так и несравненно более слабого динамического воздействия, может быть объяснен различием в скорости деформирования при таких воздействиях. Слабая интенсивность в динамике компенсируется высокой скоростью деформирования, особенно при высоких статических давлениях [26].

Заключение

Создание постоянно действующих комплексных систем геомеханического мониторинга является наиболее эффективным способом получения реальных данных и прогнозирования временного режима деформирования массивов горных пород в регионах с интенсивным техногенным воздействием на природную толщу и особенно в области разломов и крупных тектонических нарушений. При этом, актуальной задачей является создание геомеханических и геодинамических полигонов на изучаемом участке породного массива (месторождения).

Основой систем геомеханического мониторинга должно быть совместное использование натуральных измерений, расчетов и модельного анализа с использованием механико-математических и геомеханических моделей, адекватно описывающих деформирование и разрушение породных массивов. Следует подчеркнуть, что расчетные методики должны применяться не только для прогнозного анализа и как основа для разработки критериев отбора информации, но и для выбора участков и масштабов измерений.

При создании объединенных систем геомеханического и геофизического мониторингов важным представляется создание надлежащих теоретических и вычислительных основ, позволяющих взаимно дополнять эти подходы, устраняя их недостатки и объединяя достоинства.

На сегодня одним из наиболее информативных натуральных методов контроля НДС геологической среды является сейсмический.

При исследовании поведения и прогнозе реакций конкретных разломов необходимо основываться на том, что изучение поведения разлома не может проводиться изолированно от общей геодинамической ситуации в районе месторождения – необходима постановка режимных наблюдений на большой площади. При этом натурные инстру-

ментальные наблюдения в комплексе с математическим моделированием должны быть поставлены в блоках массива, соседних с разломом в процессе приближения горных работ к разлому. Локализация разлома должна быть проведена до вскрытия разлома разведочной выработкой.

В случае пересечения разлома горными выработками поведение массива и разлома должно контролироваться в течение всего времени эксплуатации выработок путем непосредственного измерения перемещений берегов разлома и сопутствующих явлений (сеймики, вариаций геопотенциала и др.) в процессе развития горных работ и других техногенных воздействий.

При рассмотрении динамических срывов и техногенных землетрясений как физических процессов необходимо исходить из положения, что эти явления представляют собой случайные процессы. Данное утверждение основывается, в частности, на том, что невозможно иметь полную информацию о состоянии породной толщи, о развитии процессов, обусловивших исходные предпосылки к возникновению этих явлений, и о внешних факторах, способствовавших их реализации. То есть динамические срывы являются следствием чрезвычайно сложных и многообразных исходных детерминированных процессов, происходящих в породной толще и имеющих как естественное, так и техногенное происхождение. Их случайный характер определяется лишь ограниченностью знаний о природе всех явлений, предшествующих срывам.

Проблема выявления надежных признаков наступающего катастрофического события является актуальной задачей в исследовании эволюционно-катастрофического поведения системы. Применительно к рассматриваемым динамическим процессам в массивах горных пород можно, например, констатировать, что *если математическую модель, описывающую механизм места возможного проявления динамического явления и его тип, можно в принципе построить, то когда такое событие произойдет и будет ли оно вообще иметь место установить крайне сложно.*

Исследованиями в натуральных условиях установлено и теоретически обосновано явление снижения скоростей упругих волн перед моментом нарушения сплошности среды. Важным представляется наблюдаемое в натуральных условиях обстоятельство, что при эволюционном приближении системы к положению неустойчивого равновесия, за которым следует катастрофический переход в другое эволюционное состояние, система должна испытывать собственные колебания, понижающейся (практически до нуля) частоты по мере подхода системы к катастрофическому порогу (положению неустойчивого равновесия). Отсюда следует, что *любая катастрофа должна предваряться медленными волновыми изменениями некоторых характеризующих состояние системы параметров. Частота этих собственных волновых движений очага неустойчивости стремится к нулю по мере приближения к порогу неустойчивости – катастрофе.*

Рассмотренные явления волнового предвестника естественных и техногенных катастроф представляются крайне важными как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Разработав соответствующие технологии и выполняя мониторинг изменения полей упругих колебаний в ответственных регионах породных массивов (в том числе и в области разломов), можно предсказать начало динамических явлений большой интенсивности.

Список использованных источников

1. **Опарин, В.Н.** Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных системах / В.Н. Опарин, А.В. Леонтьев // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: XX Всероссийская конференция с

участием иностранных ученых, Новосибирск, 2013 г. / Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН. – Новосибирск, 2013. – С. 13-24.

2. **Журавков, М.А.** Проектирование геомониторинговых систем для регионов крупномасштабного освоения подземного пространства / М.А. Журавков, А.Д. Смычник. – Минск: БелАБЖ, 1997. – 250 с.

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

4. **Журавков, М.А.** Проектирование систем сопряженного геоэкологического мониторинга. Системная организация сопряженного геоэкологического мониторинга / М.А. Журавков, Х.Р. Аль-Момани, В.Я. Щерба; под ред. В.Я. Прушака. – Минск: Вышэйшая школа, 2003. – 288 с.

5. **Доброскок, А.А.** О совместном геомеханическом и геофизическом мониторинге на шахтах и рудниках / А.А. Доброскок, А.М. Линьков, В.В. Зубков // ФТПРПИ. – 2010. – № 1. – С. 16-24.

6. **Salamon, M.D.G.** Key-note address: some applications of geomechanical modeling in rockburst and related research / M.D.G. Salamon // Proceedings of the 3rd Int. Symposium Rockbursts and Seismicity in Mines. R.P. Young (eds.) / Rotterdam: Balkema, 1993.

7. **Linkov, A.M.** Key-note address: New geomechanical approaches to develop quantitative seismicity / A.M. Linkov // Proceedings of the 4th Int. Symposium Rockbursts and Seismicity in Mines. S.I. Gibiwick, S. Lasocki (eds.) / Rotterdam: Balkema, 1997.

8. **Wiles, T.** Intergation of deterministic modeling with seismic monitoring for assessment of the rockmass response to mining / T. Wiles, R. Lachenicht, G. van Aswegen // Proceedings of the 5th Int. Symposium Rockbursts and Seismicity in Mines. Ra Sim, G. van Aswegen, R. Durrheim, D. Ortlepp (eds.) / Sourth African Institute of Mining and Metallurgy, 2001.

9. **Sellers, E.J.** A point kernel representation of large-scale seismic activity in mining / E.J. Sellers, J.A.L. Napier // Proceedings of the 5th Int. Symposium Rockbursts and Seismicity in Mines. Ra Sim, G. van Aswegen, R. Durrheim, D. Ortlepp (eds.) / Sourth African Institute of Mining and Metallurgy, 2001.

10. **Spottiswoode, S.** Keynote address: Synthetic seismicity mimics observed seismicity in deep tabular mines / S. Spottiswoode // Proceedings of the 5th Int. Symposium Rockbursts and Seismicity in Mines. Ra Sim, G. van Aswegen, R. Durrheim, D. Ortlepp (eds.) / Sourth African Institute of Mining and Metallurgy, 2001.

11. **Linkov, A.M.** Integration of numerical modeling and seismic monitoring: general theory and first steps / A.M. Linkov // Proc. Int. Conference New Developments in Rock Mechanics. Yunmei Lin (eds.) / Rinton Press, New York, 2002.

12. **Линьков, А.М.** Численное моделирование сейсмических и асейсмических событий в геомеханике / А.М. Линьков // ФТПРПИ. – 2005. – № 1. – С. 19-33.

13. **Линьков, А.М.** Численное моделирование сейсмических и асейсмических событий в трехмерных задачах кинетики горных пород / А.М. Линьков // ФТПРПИ. – 2006. – № 1. – С. 3-17.

14. **Козырев, А.А.** Геомеханическое обеспечение горных работ при отработке удароопасных месторождений в тектонически напряженных массивах / А.А. Козырев // Геомеханика при ведении горных работ в высоконапряженных массивах. – Апатиты: КНЦ РАН, 1998. – С. 11-25.

15. **Моргунов, В.А.** Реальности прогноза землетрясений / В.А. Моргунов // Физика Земли. – 1999. – № 1. – С. 79-91.

16. **Козырев, А.А.** Особенности прогноза и профилактики мощных динамических явлений в природно-технических системах / А.А. Козырев [и др.] // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: сб. тр. конф. / ИГД СО РАН. – Новосибирск, 2001.

17. **Линдин, Г.Л.** Особенности сейсмоактивности Таштагольского месторождения перед горными ударами / Г.Л. Линдин, Т.В. Лобанова // ФТПРПИ. – 2012. – № 2. – С. 70-79.
18. **Бобряков, А.П.** Модельные исследования поведения деформированной блочной геосреды при подготовке землетрясений / А.П. Бобряков, А.В. Лубягин // ФТПРПИ. – 2011. – № 6. – С. 22-29.
19. **Паламарчук, В.К.** Проблемы информационного обеспечения и построения системы ближнего прогноза землетрясений / В.К. Паламарчук, В.Р. Кирейтов // Геоинформатика. – 2000. – № 2. – С. 32-41.
20. **Козырев, А.А.** Геомеханическое обеспечение технических решений при ведении горных работ в высоконапряженных массивах / А.А. Козырев [и др.] // ФТПРПИ. – 2012. – № 2. – С. 46-55.
21. Сейсмичность при горных работах / А.А. Козырев [и др.]; под ред. Н.Н. Мельникова. – Апатиты: КНЦ РАН, 2002.
22. **Козырев, А.А.** Выделение зон повышенной сейсмоопасности по комплексу прогностических критериев / А.А. Козырев [и др.] // Горный журнал. – 2010. – № 9. – С. 44-47.
23. **Ричард Аллен** Мгновением раньше / Аллен Ричард // В мире науки. – 2011. – № 6. – С. 58-64.
24. **Пол Ричардс** Мониторинг ядерных взрывов / Пол Ричардс, Вон Юнг Ким // В мире науки. – 2009. – № 5. – С. 42-49.
25. **Опарин, В.Н.** К проблеме информационного обеспечения мониторинга геодинамических процессов в условиях интенсивного недропользования в Кузнецком бассейне / В.Н. Опарин, В.П. Потапов, А.С. Танайно // ФТПРПИ. – 2006. – № 5. – С. 40-66.
26. **Машинский, Э.И.** Аномалии затухания амплитуды акустических волн малой интенсивности в горных породах / Э.И. Машинский // ФТПРПИ. – 2008. – № 4. – С. 24-31.
27. **Mashinskii, E.I.** Experimental study of the amplitude effect on wave velocity and attenuation in consolidated rocks under confining pressure / E.I. Mashinskii // Journal of Geophysics and Engineering. – 2005. – № 2-3.
28. **Winkler, K.** Friction and Seismic Attenuation in Rock / K. Winkler, A. Nur, M. Gladwin. – Nature (London), 1979.
29. **Johnson, P.A.** Resonance and elastic nonlinear phenomena in rock / P.A. Johnson, B. Zinszner, P.N.J. Rasolofosoan // J. Geophys. Res. – 1996. – V. 101. – B. 5.
30. **Ostrovsky, L.A.** Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials / L.A. Ostrovsky, P.A. Johnson // La Rivista del Nuovo Cimento. – 2001. – V. 24. – № 4-7.
31. **Ten Cate, J.A.** Slow dynamics in the nonlinear elastic response / J.A. Ten Cate, T.J. Shankland // J. Geophys. Res. – 1996. – V. 23. – № 21.
32. **Дубровский, В.А.** Универсальный предвестник геомеханических катастроф / В.А. Дубровский, В.Н. Сергеев // ДАН, 2004. – Т. 395, № 4. – С. 479-481.
33. **Дубровский, В.А.** Тектоника неогена: общие и региональные аспекты / В.А. Дубровский, В.Н. Сергеев. – М.: ГЕОС, 2001. – С. 222-226.
34. **Дубровский, В.А.** Литосфера Центральной и Восточной Европы. Геодинамика / В.А. Дубровский. – Киев: Наук. Думка, 1988. – С. 118-124.
35. **Дубровский, В.А.** Тектонические волны // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1985. – № 1. – С. 29-34.
36. **Dubrovskiy, V.A.** Wave propagation along faults and the onset of slip instability / V.A. Dubrovskiy, D. Dieterich // EOS. – 1989. – V. 71. – P. 635-636.
37. Seismic trapped modes in the Oroville and San Andreas fault zones / Y.-G. Li, P.C. Leary, K. Aki, P.E. Malin // Science. – 1990. – V. 249. – P. 763-766.
38. **Нестеров, В.В.** Большебазовые лазерные интерферометры в геофизических исследованиях / В.В. Нестеров. – Симферополь: Таврия, 1996. – 284 с.

39. **Соболев, Г.А.** Эволюция периодических колебаний сейсмической интенсивности перед сильными землетрясениями / Г.А. Соболев // Физика Земли. – 2003. – № 11. – С. 3-15.
40. **Dubrovskiy, V.A.** Universal precursor of the earthquakes. Experience of the retrospective prediction / V.A. Dubrovskiy, V.N. Sergeev // Geophysical Research Abstracts. – 2005. – Vol. 7 (10686). – SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU05-A-10686.
41. Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes / Ed. M. Hayakawa. – Tokyo: Terra Sci. Publ., 1999.
42. **Dubrovskiy, V.A.** Mechanism of generation of an electrical field / V.A. Dubrovskiy, N.N. Rusakov // Doklady of the Academy of Sciences of the USSR. Earth Science Sections. – 1990. – Т. 306. – № 3. – С. 4-7.
43. **К.Е.-А. Van den Abeele** On the Quasi-analytic treatment of Hysteretic Nonlinear response in Elastic wave propagation / К.Е.-А. Van den Abeele, P.A. Johnson, R.A. Guyer // J. Acoust. Soc. Am. – 1997. – V. 101. – № 4.
44. **Tutuncu, A.N.** Nonlinear Viscoelastic Behavior of Sedimentary Rocks. Part I: Effect of Frequency and Strain Amplitude / A.N. Tutuncu, A.L. Podio, A.R. Gregory, M.M. Sharma // Geophysics. – 1998. – V. 63. – № 1.
45. **McCall, K.R.** Equation of State and Wave Propagation in Hysteretic Nonlinear Elastic materials / K.R. McCall, R.A. Guyer. // J. Geophys. Res. – 1994. – V. 12. – № 99.
46. **Guyer, R.A.** Nonlinear mesoscopic elasticity: Evidence for a new class of materials / R.A. Guyer, P.A. Johnson // Physics Today. – 1999. – V. 52. – № 4.
47. **Машинский, Э.И.** Амплитудозависимые эффекты в диапазоне малых сейсмических деформаций / Э.И. Машинский, В.З. Кокшаров, Ю.А. Нефедкин // Геология и геофизика. – 1999. – Т. 40, № 4.
48. **Курленя, М.В.** Нелинейные эффекты при излучении и распространении вибросейсмических сигналов в массиве горных пород / М.В. Курленя, С.В. Сердюков // ФТПРПИ. – 1999. – № 2.
49. **Zaitsev, V.Yu.** Experimental Study of the Self-Action of Seismoacoustic Waves / V.Yu. Zaitsev, V.E. Nazarov, V.I. Talanov // Acoustic Physics. – 1999. – V. 45. – № 6.
50. **Mashinskii, E.I.** Nonlinear amplitude-frequency characteristics of attenuation in rock under pressure / E.I. Mashinskii // J. Geophys. Eng. – 2006. – № 3.
51. **Mashinskii, E.I.** Nonlinear stress-strain relation in sedimentary rocks and its effect on seismic wave velocity / E.I. Mashinskii // Geophysica. – 2005. – V. 41. – № 1-2.

Zhuravkov M.A.

Technogeneus dynamic events in the regions with a large-scale development of the mining area

Part III. Monitoring of technogeneus dynamic events

The article is a continuation of the first two parts of the series devoted to the consideration of various aspects of the general integrated problem of investigation, modeling and forecasting such classes of dynamic processes as technogeneus earthquakes, dynamic failures, induced dynamic phenomena appearing in the rock mass as a result of large-scale mining operations. The general questions concerning the organization of monitoring systems of dynamic catastrophic events are considered in this paper.

Поступила в редакцию 12.03.2014 г.

УДК 622.272.64(047)

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ПОДГОТОВКИ И ОТРАБОТКИ ТРЕТЬЕГО КАЛИЙНОГО ПЛАСТА НА ШАХТНОМ ПОЛЕ КРАСНОСЛОБОДСКОГО РУДНИКА

Головатый И.И., Петровский А.Б., Петровский Ю.Б. (ОАО «Беларуськалий», г. Солигорск, Беларусь), Прушак В.Я. (ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», Беларусь), Петровский Б.И., Поляков А.Л., Гарнишевский А.А. (Унитарное предприятие «Институт горного дела» г. Солигорск, Беларусь)

В статье на основании накопленного производственного опыта и результатов научных исследований изложены принципы построения технологических схем подготовки и отработки Третьего калийного пласта на шахтном поле Краснослободского рудника. Разработаны технологические схемы слоевой бесцеликовой выемки пласта. Для участков с замещением II и III сильвинитовых слоев каменной солью предложены комбинированная система разработки и обособленная выемка IV сильвинитового слоя столбовой системой.

Введение

Применяемые в настоящее время на рудниках ОАО «Беларуськалий» технологические схемы слоевой выемки Третьего калийного пласта являются достаточно эффективными и высокопроизводительными, но в то же время в большинстве случаев их характеризует низкое извлечение запасов полезного ископаемого из недр из-за оставления широких охранных целиков, а также периодическое внезапное повышение интенсивности горного давления в нижних лавах при обрушениях основной кровли. Специальными исследованиями с помощью буровых наблюдательных скважин было установлено, что при опережающей отработке IV сильвинитового слоя верхней лавой на оставляемых в выработанном пространстве широких целиках труднообрушаемая кровля не всегда полностью обрушается. На некоторых участках выемочных столбов со стороны бортовых штреков формируются зависшие породные консоли, которые при последующей отработке слоев II, II-III и III нижней лавой динамически обрушаются на призабойное пространство, создавая аварийные ситуации. Для предотвращения динамических обрушений кровли в настоящее время разработаны и используются защитные мероприятия, включающие разупрочнение кровли путем дообрушения зависших породных консолей с помощью буровзрывных работ, выполняемых из бортовых штреков нижних лав. Из вышеизложенного следует, что оставляемые при слоевой выемке Третьего пласта широкие целики не только приводят к большим потерям запасов, но и являются при труднообрушаемых кровлях причиной возникновения повышенного горного давления в нижних лавах.

Так как кровля пласта на Краснослободском руднике, в основном, относится к труднообрушаемой, то основополагающим принципом, который должен соблюдаться при разработке технологических схем, должен являться принцип уменьшения охранных целиков до минимальных размеров вплоть до полного их исключения, который может быть реализован за счет:

- проведения подготовительной выработки отстающей смежной лавы позади опережающей лавы вприсечку (с целиком не более 5 м) к выработанному пространству;
- оставления между выемочными столбами временного охрannого целика, погашаемого очистным комбайном отстающей смежной лавы. Погашение межстолбового

целика возможно либо путем повторного использования выработки опережающей лавы, в которую вырубается комбайн, либо путем выемки части межстолбового целика тупиковым забоем [1-5].

На устойчивость подготовительных выработок в технологических схемах с повышенным извлечением запасов из недр большое влияние оказывает порядок отработки верхнего и нижнего слоев. При одновременной отработке слоев в пределах панели выработки верхней и нижней лав могут оказаться в зоне совместного опорного давления от обеих лав и накопить критические деформации. При последовательной отработке слоев в пределах панели подобное явление исключается, поэтому такая отработка является более предпочтительной.

На Краснослободском руднике в настоящее время в силу известных причин принят прямой порядок отработки панелей по IV сильвинитовому слою на всех четырех главных направлениях. При этом охрана панельных выработок от влияния очистных работ осуществляется целиками шириной 80-90 м. В дальнейшем для возможности разработки бесцеликовых технологических схем необходим переход на обратный порядок отработки панелей.

Для обеспечения безопасного поддержания подготовительных выработок при отработке верхнего и нижнего слоев бесцеликовыми технологиями или с оставлением целиков минимальных размеров немаловажную роль играет учет горно-геологического фактора, а именно – наличия в непосредственной кровле пласта V или VI сильвинитовых слоев. При расположении подготовительных выработок верхней лавы под этими слоями, как показал практический опыт, существенно повышается их устойчивость. Такая привязка к пласту, кроме того, исключает в дальнейшем пересечение выработок верхней лавы нижней лавой, что благоприятно отражается на состоянии ее призабойного пространства. На Краснослободском руднике в непосредственной кровле пласта по данным пробуренных скважин на всех главных направлениях имеются V и VI сильвинитовые слои мощностью до 0,15 м – V слой и от 0,32 до 0,56 м – VI слой (таблица).

Таблица – Средние значения мощностей сильвинитовых и галитовых слоев по участкам шахтного поля

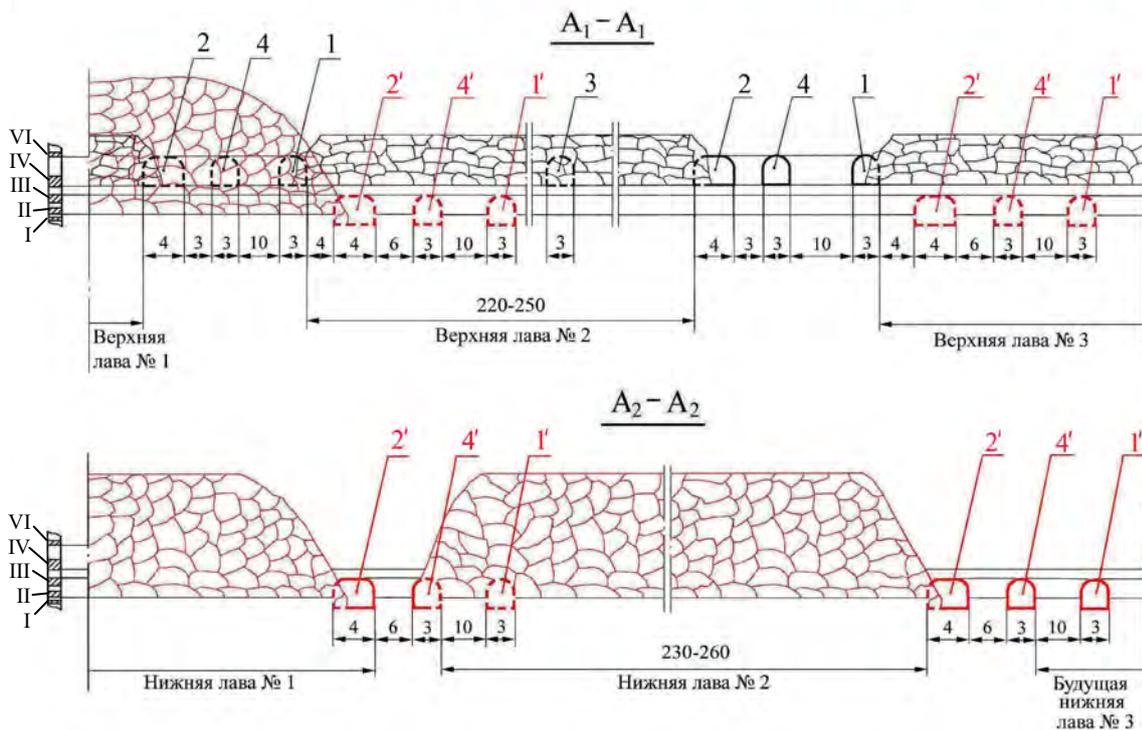
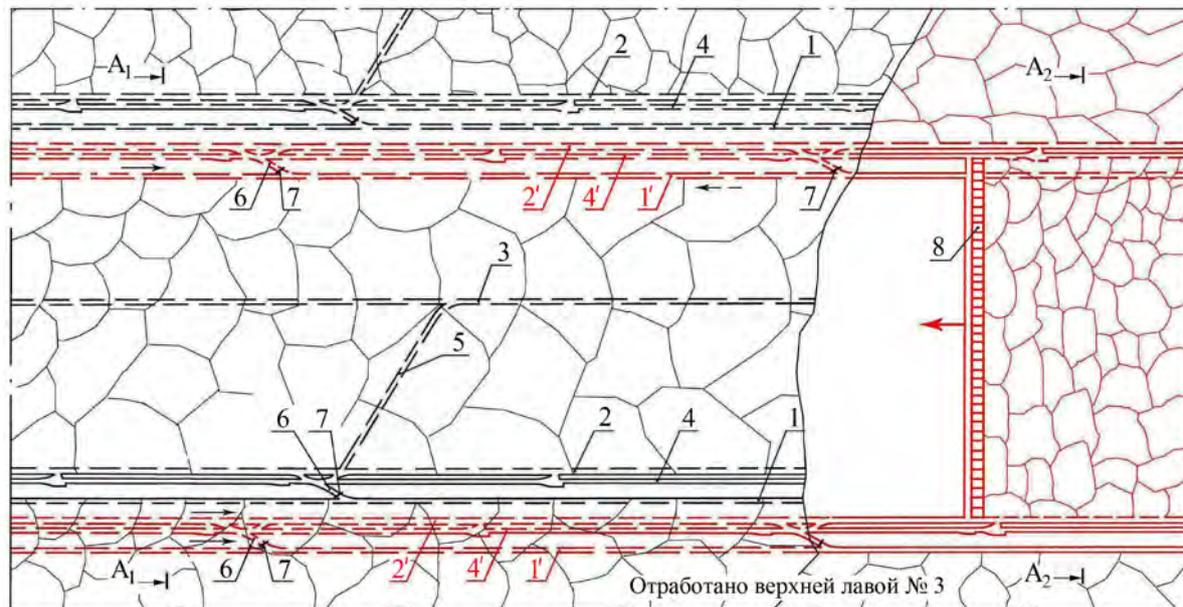
Участки шахтного поля	Средние мощности слоев пласта, м								
	II	II-III	III	III-IV	IV	IV-V	V	V-VI	VI
Северо-восток	0,50	0,57	0,77	1,10	1,20	0,67	0,14	0,79	0,56
Юго-восток	0,56	0,55	0,80	1,10	1,19	0,70	0,13	0,75	0,32
Юг	0,49	0,58	0,79	1,27	0,78	0,47	0,04	0,76	0,43
Запад	0,55	0,55	0,77	1,26	1,18	0,71	0,11	0,75	0,50
Северо-запад	0,55	0,53	0,79	1,10	1,27	0,70	0,15	0,80	0,56

Особенностью геологического строения Третьего калийного пласта на шахтном поле Краснослободского рудника является наличие участков, на которых II и III сильвинитовые слои замещены каменной солью, поэтому для отработки таких участков предложены комбинированная система разработки и технологическая схема бесцеликовой выемки IV сильвинитового слоя столбовой системой.

Описание технологических схем

С учетом изложенных выше принципов разработаны перспективные технологические схемы слоевой бесцеликовой выемки Третьего калийного пласта. На рисунке 1 показан вариант технологии слоевой бесцеликовой выемки Третьего калийного пласта

с последовательной обработкой верхнего IV сильвинитового слоя и нижнего слоя, включающего слои II, II-III и III, при их валовой отработке нижней лавой.



1 – панельный транспортный штрек верхней лавы; 2, 3, 4 – конвейерный, вентиляционный, транспортный штреки верхней лавы; 1', 2', 4' – вентиляционный, конвейерный, транспортный штреки нижней лавы; 5 – вспомогательные выработки верхней лавы; 6 – технологические сбойки; 7 – изолирующие перемычки; 8 – очистной забой нижней лавы

Рисунок 1 – Технологическая схема слоевой бесцеликовой выемки Третьего калийного пласта с последовательной отработкой верхнего и нижнего слоев в пределах панели и валовой выемкой нижнего (II, II-III, III) слоя с вырубкой очистного комбайна в повторно используемый транспортный штрек

В данном и последующем вариантах отражен момент отработки участка шахтного поля, когда первая панель отработана по обоим слоям, вторая панель находится в отработке по нижнему слою под выработанным пространством верхней лавы, а третья панель отработана по верхнему слою.

Технологическая схема предусматривает возможность одновременной отработки верхнего слоя на двух-трех панелях [6]. Подготовка верхних лав длиной 220-250 м – групповая, и включает в себя проходку четырех штреков: панельного транспортного штрека 1 и трех выемочных штреков лавы: конвейерного 2, вентиляционного 3 и транспортного 4. Для проходки в центре выемочных столбов вентиляционных штреков 3 через каждые 400 м по длине столбов проводятся вспомогательные выработки 5. Кроме того, в проходке участвуют технологические сбойки 6, соединяющие штреки 1, 2 и 4, в которых возводятся изолирующие перемычки, предотвращающие проникновение горючих газов из выработанного пространства. Между транспортными штреками 4, предназначенными для доставки людей и оборудования, и панельными транспортными штреками 1 смежной панели оставляются целики шириной 10 м.

Проветривание очистных забоев осуществляется за счет общешахтной депрессии. Свежая струя воздуха поступает в очистной забой по фланговым (конвейерному 2, транспортному 4 и панельному транспортному 1) штрекам, а исходящая струя воздуха из очистного забоя выдается по вентиляционному штреку 3.

Подготовка нижних лав длиной 230-260 м начинается после отработки двух панелей по IV сильвинитовому слою и заключается в проходке для каждой лавы группы из трех штреков – конвейерного 2', транспортного 4' и вентиляционного 1', располагающихся в краевых разгруженных от горного давления зонах, образованных верхней лавой собственной панели (штреки 1' и 4') и верхней лавой смежной панели (штрек 2').

Ширина разгруженной зоны B_p определяется по формуле:

$$B_p = (69,94 - 6,836T + 0,296T^2) \cdot K_o, \text{ м,}$$

где T – время с момента отработки верхнего слоя, лет;

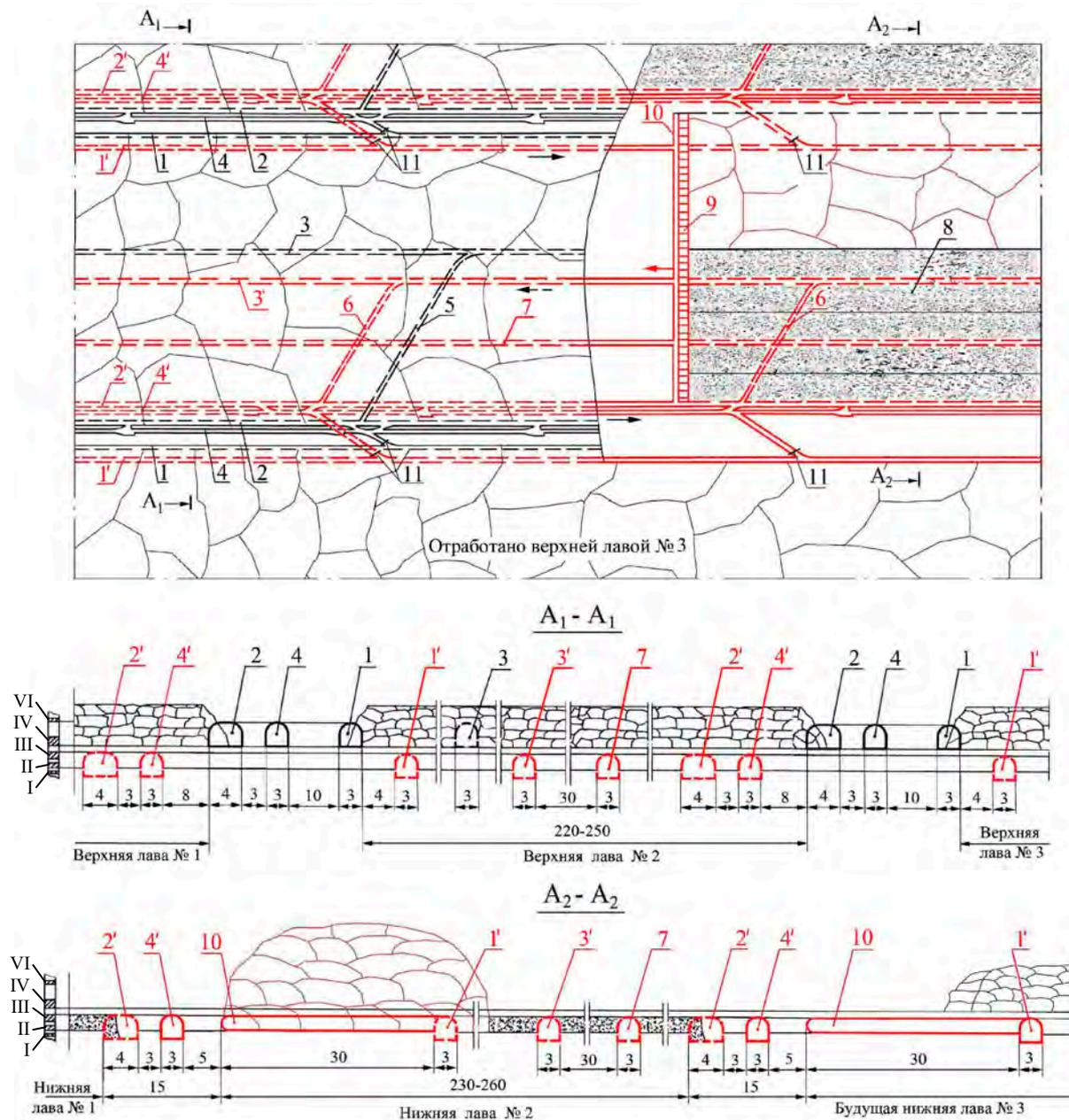
K_o – коэффициент обрушаемости пород основной кровли: $K_o = 1,0$ – для труднообрушаемой кровли; $K_o = 0,8$ – для среднеобрушаемой кровли; $K_o = 0,7$ – для легкообрушаемой кровли.

Проходка подготовительных выработок для верхних лав ведется под VI сильвинитовым слоем, а для нижних лав – или под слоем каменной соли III-IV, или с оставлением в кровле выработок пачки III сильвинитового слоя мощностью 30 см.

В данном варианте слоевой выемки отработка десятиметровых целиков между выемочными столбами верхних лав не предусмотрена, но при необходимости может быть осуществлена очистным комбайном отстающей смежной лавы. Целики шириной 10 м, оставляемые между выемочными столбами нижних лав, отрабатываются отстающей смежной лавой с вырубкой комбайна в повторно используемый транспортный штрек 4', который используется только для подачи свежего воздуха в лаву без возможности передвижения по нему людей и доставки оборудования, поэтому установка крепи сопряжения с лавой в этом штреке не требуется.

Для уменьшения срока службы повторно используемых штреков 4' отработку смежных выемочных столбов нижними лавами предпочтительнее вести одновременно с расстоянием между очистными забоями не более 400 м. С таким же расстоянием целесообразно вести отработку смежных выемочных столбов верхними лавами в том случае, когда оставляемые межстолбовые целики будут погашаться отстающей лавой с вырубкой очистного комбайна в транспортные штреки 4.

На рисунке 2 показан вариант слоевой бесцеликовой выемки Третьего калийного пласта с последовательной обработкой верхнего и нижнего слоев в пределах панели и селективной выемкой нижней лавы слоев II, II-III, III с частичным погашением временного охранного целика тупиковым забоем отстающей смежной лавы [6].



1, 1' – панельные транспортные штреки верхней и нижней лав; 2, 3, 4 – конвейерный, вентиляционный, транспортный штреки верхней лавы; 2', 3', 4' – конвейерный, вентиляционный, транспортный штреки нижней лавы; 5, 6 – технологические выработки верхней и нижней лав; 7 – закладочный штрек; 8 – породные полосы; 9 – очистной забой нижней лавы; 10 – тупиковый забой нижней лавы; 11 – изолирующие перемычки

Рисунок 2 – Технологическая схема слоевой бесцеликовой выемки Третьего калийного пласта с последовательной обработкой верхнего и нижнего слоев в пределах панели и селективной выемкой нижнего (II, II-III, III) слоя с использованием тупикового забоя

В этом варианте подготовительные выработки нижней лавы – конвейерный 2', транспортный 4' и панельный транспортный 1' штреки – располагаются в разгруженных зонах, образованных верхней лавой собственной панели. Временный целик шириной 35 м между панельным транспортным 1' и транспортным 4' штреками частично извлекается тупиковым забоем отстающей смежной лавы, который проветривается вентилятором местного проветривания.

Закладка разрушенного галитового слоя II-III ведется из конвейерного штрека 2', вентиляционного штрека 3' и закладочного штрека 7, пройденных в поле выемочного столба, с помощью закладочных комплексов, установленных на сопряжениях штреков с лавой.

В следующем варианте слоевой бесцеликовой выемки Третьего калийного пласта предусматривается вовлечение в отработку VI сильвинитового слоя на северо-восточном, западном и северо-западном участках шахтного поля, где средняя мощность этого слоя составляет 0,50-0,56 м [6].

В этом варианте верхний слой включает в себя слои IV, IV-V, V, V-VI и VI. Выемка этих слоев в верхней лаве ведется селективным способом с разрушением слоев IV-V, V, V-VI и размещением их в выработанном пространстве лавы. Подготовка и отработка нижнего слоя аналогична предыдущему варианту с селективной выемкой слоев II, II-III и III.

Целики шириной 10 м, оставляемые между выемочными столбами верхних лав не извлекаются, а межпанельные целики шириной до 35 м между нижними лавами погашаются отстающими смежными лавами с вырубкой очистного комбайна в повторно используемые транспортные штреки.

Наряду с повышенным извлечением запасов преимуществом данного варианта перед описанными выше является снижение интенсивности обрушений кровли на призабойное пространство нижних лав за счет того, что при большей вынимаемой мощности слоев в верхней лаве по сравнению с нижней лавой (таблица) в обрушение кровли за нижней лавой будут вовлекаться только обрушенные породы от выемки верхнего слоя. Отсутствие интенсивных проявлений горного давления на нижнюю лаву при подобном соотношении вынимаемых мощностей в верхней и нижней лавах подтверждается опытом разработки Эльзасского калийного месторождения во Франции [7, 8].

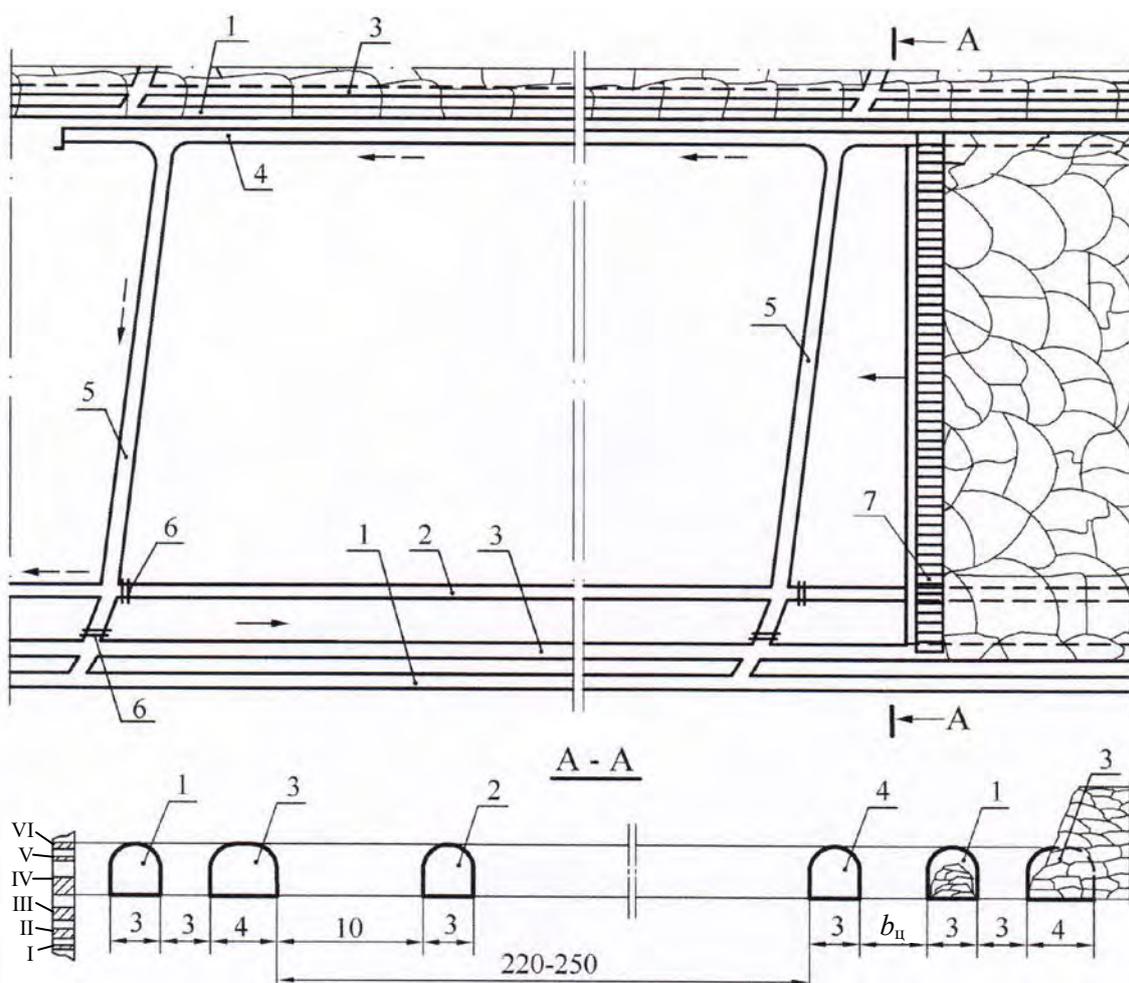
Для участков шахтного поля с замещением II и III сильвинитовых слоев каменной солью предлагаются технологические схемы бесцеликовой выемки IV сильвинитового слоя, построенные с соблюдением тех же принципов, которые были использованы при слоевой выемке пласта.

В первом варианте (рисунок 3) подготовка панелей осуществляется проходкой сразу на всю длину панельных конвейерного 1 и вентиляционного 2 штреков и конвейерного 3 штрека лавы со вспомогательными выработками 5. Вентиляционный штрек 4 лавы проходится вприсечку к выработанному пространству опережающей смежной лавы либо на заключительном этапе подготовки встречными забоями, либо поэтапно с отставанием от очистного забоя смежной лавы и не менее 400 м.

Ширина ленточного целика $b_{ц}$ между присечной выработкой и выработкой отработанной (отрабатываемой) смежной панели должна определяться в зависимости от глубины разработки H по эмпирической зависимости:

$$b_{ц} = 0,0107H - 0,0000029H^2 - 1,429, \text{ м.}$$

При глубине залегания Третьего калийного пласта на Краснослободском руднике от 490 до 800 м ширина целика $b_{ц}$ составит 3,1-5,3 м.



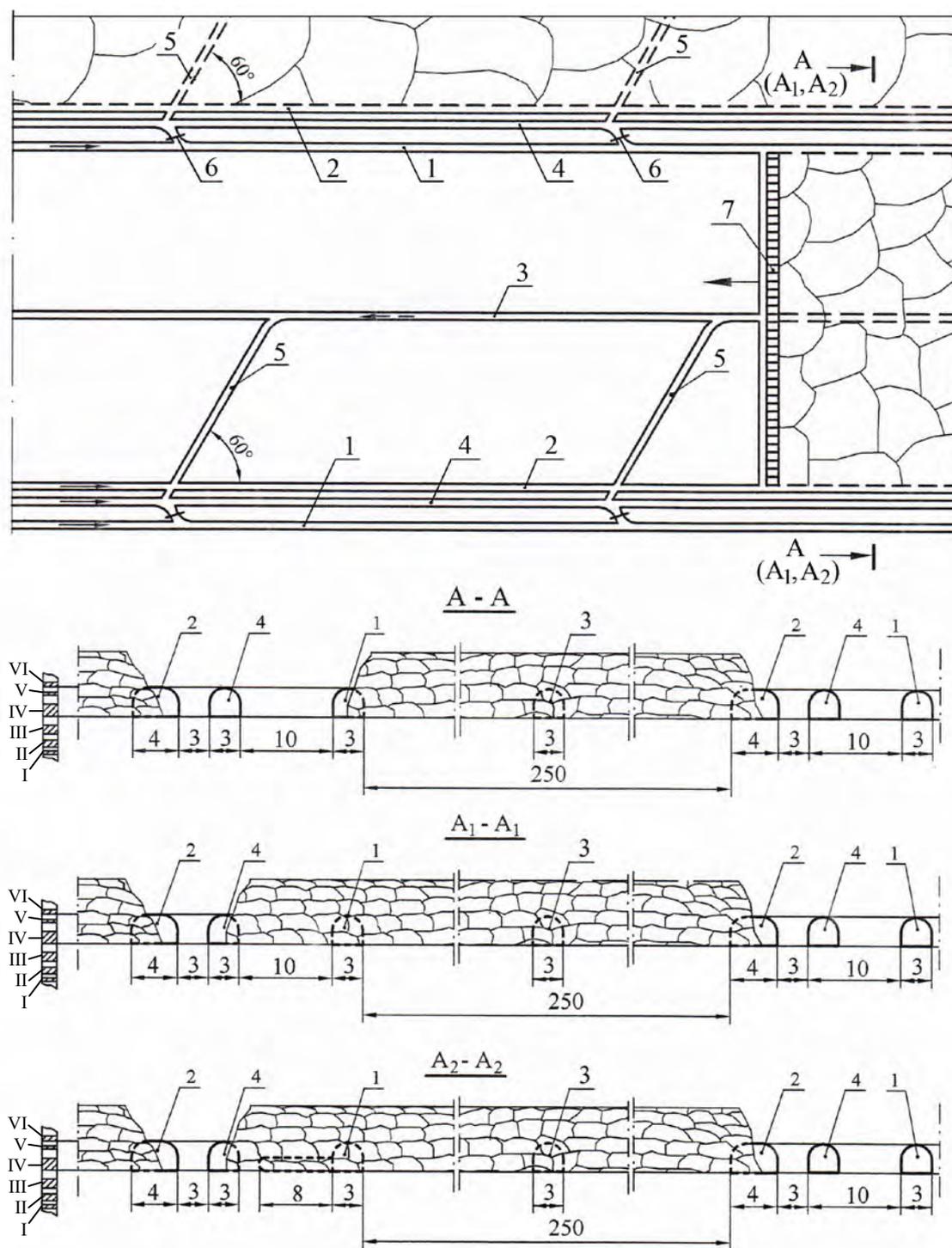
- 1, 2 – панельные конвейерный и вентиляционный штреки; 3 – конвейерный штрек лавы;
 4 – вентиляционный штрек лавы; 5 – вспомогательные выработки;
 6 – вентиляционные перемычки; 7 – забойная крепь

Рисунок 3 – Технологическая схема бесцеликовой выемки IV сальвинитового слоя с поэтапным проведением вентиляционного штрека лавы вприсечку к выработанному пространству

В технологической схеме с поэтапным проведением присечной выработки очистные работы начинаются после оконтуривания первого от монтажного штрека короткого выемочного столба длиной 400-800 м. Для обеспечения фронтальной зарубки очистного комбайна в каждом технологическом цикле с целью повышения производительности за счет сокращения вспомогательных операций панельный вентиляционный штрек 2 располагается в поле выемочного столба с целиком от конвейерного штрека 3, равным расстоянию между шнеками очистного комбайна.

Проветривание лавы осуществляется путем подачи свежего воздуха по панельному конвейерному штреку 1 и конвейерному штреку лавы 3, а исходящая струя воздуха из лавы через подготовленный участок вентиляционного штрека 4 и вспомогательную выработку 5 поступает на изолированный от свежей струи перемычками 6 панельный вентиляционный штрек 2.

На рисунке 4 представлен второй вариант последовательной отработки панелей по IV сальвинитовому слою с оставлением между панелями временного охранного целика.



1 – панельный транспортный штрек; 2, 3, 4 – конвейерный, вентиляционный и транспортный штреки лавы; 5 – технологические выработки; 6 – изолирующие перемычки; 7 – очистной забой

Рисунок 4 – Технологическая схема бесцеликовой выемки IV сивьинитового слоя с оставлением между панелями временного охранного целика

В этом варианте схема подготовки и отработки панелей по IV сивьинитовому слою не отличается от описанной ранее в вариантах 1 и 2 слоевой бесцеликовой выемки пласта и предусматривает возможность одновременной подготовки и отработки

IV слоя на 2-3 панелях. Подготовка каждой панели ведется группой из четырех штреков – панельного транспортного штрека 1, конвейерного 2, вентиляционного 3 и транспортного штрека 4 лавы с оставлением между транспортными штреками 1 и 4 временного целика шириной 10 м. Десятиметровые межпанельные целики могут не извлекаться (рисунок 4, сечение А-А), либо погашаться полностью или частично очистным комбайном отстающей смежной лавы. В варианте с полным извлечением целика (рисунок 4, сечение А₁-А₁) комбайн вырубается на повторно используемый штрек 4, выполняющий только функцию проветривания прилегающей к нему части очистного забоя без передвижения по нему людей и доставки оборудования. Частичное погашение целика производится тупиковым забоем длиной 6-8 м, образованным очистным комбайном отстающей смежной лавы (рисунок 4, сечение А₂-А₂).

Проветривание каждого очистного забоя осуществляется за счет общешахтной депрессии. Свежая струя воздуха поступает в очистной забой по фланговым (конвейерному 2, транспортному 4 и панельному транспортному 1 штрекам), а исходящая струя воздуха из очистного забоя выдается по вентиляционному штреку 3.

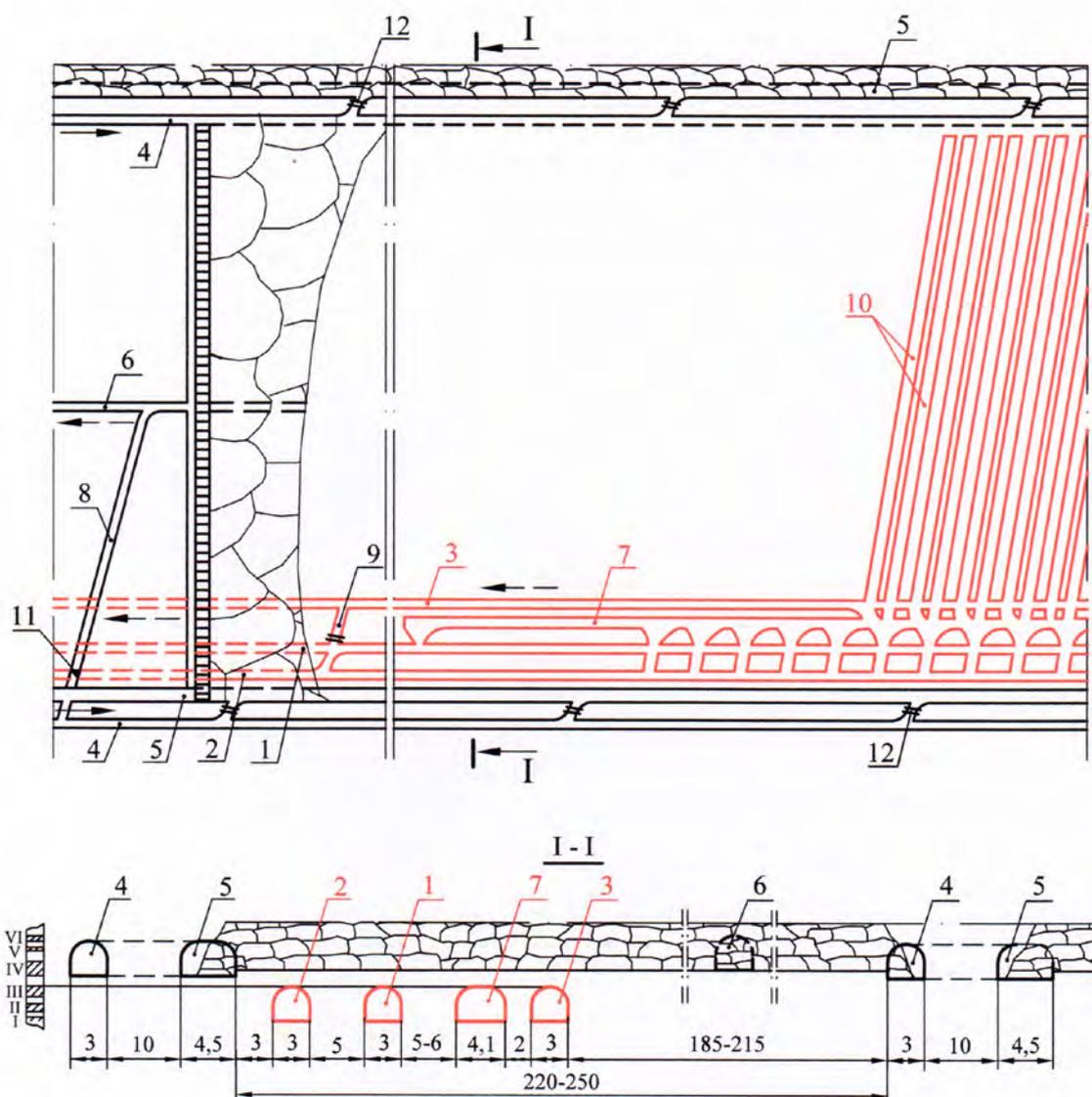
В случае замещения II и III сальвинитовых слоев на отдельных участках по длине панели целесообразно применять комбинированную систему разработки с выемкой IV сальвинитового слоя лавой, а слоев II, II-III и III – камерами с использованием проходческо-очистного комплекса типа Урал-10КС [6]. Такая система разработки позволяет производить выемку нижней части пласта только на тех участках в пределах панели, где имеются II и III сальвинитовые слои, и обходить участки, где эти слои замещены галитом. Этому условию наиболее полно отвечает технологическая схема, приведенная на рисунке 5, предназначенная для применения в благоприятных по фактору поддержания подготовительных выработок горно-геологических условиях: глубина залегания не более 800 м, наличие в кровле устойчивых V и VI сальвинитовых слоев, к которым осуществляется привязка подготовительных выработок лавы [9].

Подготовка панели по технологической схеме рисунка 5 начинается с проведения в нижнем слое панельных (транспортного 1, конвейерного 2 и вентиляционного 3 штреков), которые располагаются в пределах выемочного столба лавы и надрабатываются ею при ведении очистных работ. По мере проведения панельных выработок проходятся выемочные (транспортный 4, конвейерный 5 и вентиляционный 6 штреки лавы по IV сальвинитовому слою с использованием вспомогательных выработок 8 и рудоспусков 11 с оставлением между транспортным и конвейерным штреками целика шириной 10 м. Транспортный штрек 4 предусматривается использовать повторно в следующей лаве только для подачи в нее свежего воздуха.

Очистная выемка нижних слоев камерной системой ведется по панельной схеме двумя комбайнами, один из которых проводит участками стартовый штрек 7 между панельными транспортным 1 и вентиляционным 3 штреками и разделяет камеры разворота, а другой комбайн ведет очистную выемку с расположением очистных ходов перпендикулярно или под углом к продольной оси панели. Стартовый штрек проводится с отставанием от забоя лавы не менее 100 м и после окончания проведения каждого из его участков сбивается с панельным транспортным штреком. Затем комбайн отгоняется и продолжает опережающую разделку камер разворота с оформлением сбоек с панельным конвейерным штреком 2.

Проветривание очистного забоя осуществляется подачей свежего воздуха по транспортному 4 и конвейерному 5 штрекам, а выдача исходящей струи воздуха осуществляется по вентиляционному штреку 6 лавы.

Свежая струя воздуха в очистные камеры поступает по панельным транспортному 1, конвейерному 2 штрекам и стартовому штреку 7, омывает с помощью ВПМ забой очистных камер и по панельному вентиляционному штреку 3 уходит на главный вентиляционный штрек.



1, 2, 3 – панельные транспортный, конвейерный и вентиляционный штреки, надрабатываемые лавой; 4, 5, 6 – транспортный, конвейерный и вентиляционный штреки лавы; 7 – стартовый штрек; 8, 9 – вспомогательные выработки; 10 – очистные камеры; 11 – рудоспуск; 12 – изолирующие вентиляционные перемычки

Рисунок 5 – Комбинированная система разработки с межпанельными целиками минимальных размеров при панельной схеме подготовки и отработки нижних слоев пласта

Заключение

1. В настоящее время на Краснослободском руднике ведется отработка IV сильвинитового слоя Третьего калийного пласта на всех четырех главных направлениях (северном, южном, западном и восточном). Из-за необходимости достижения проектной мощности рудника в сжатые сроки на всех направлениях принят прямой порядок отработки первых панелей, требующий оставления для охраны панельных выработок широких внутрипанельных и межпанельных целиков, в которых теряется до 40 % подготовленных запасов. С учетом принятой технологической схемы подготовки и отра-

ботки панелей по IV сальвинитовому слою аналогичная ситуация будет складываться и при обработке нижних слоев II, II-III и III на этих панелях.

В связи с этим в условиях дефицита запасов полезного ископаемого и имеющего место замещения II и III сальвинитовых слоев каменной солью первоочередной задачей для Краснослободского рудника становится задача рационального использования запасов в недрах. Эта задача может быть успешно решена только путем разработки новых технологических схем, позволяющих снизить или исключить потери полезного ископаемого в охранных целиках и обеспечивающих безопасное поддержание очистных забоев и подготовительных выработок на границе с выработанным пространством.

2. Разработаны технологические схемы отработки Третьего калийного пласта на шахтном поле Краснослободского рудника, учитывающие изменчивость строения пласта в пределах шахтного поля и наличие в кровле пласта V и VI сальвинитовых слоев.

3. Отработку участков шахтного поля, на которых промышленный пласт сложен тремя сальвинитовыми слоями (II, III и IV), целесообразно осуществлять по технологии слоевой бесцеликовой выемки с обратным порядком отработки панелей. По этой технологии ведется последовательная выемка верхнего IV сальвинитового слоя и нижнего (II, II-III, III) слоя в пределах панели с оставлением временных охранных целиков шириной 10 м между выемочными столбами верхних лав и шириной до 35 м между выемочными столбами нижних лав. Погашение межстолбовых целиков производится очистным комбайном отстающей смежной лавы с вырубкой его в повторно используемый транспортный штрек или путем выемки комбайном части межстолбового целика тупиковым забоем. При суммарной мощности нижнего слоя менее 1,8 м для его отработки необходимо применять валовый способ, а при большей мощности – селективный способ.

На западном, северо-западном и северо-восточном участках шахтного поля мощность VI сальвинитового слоя составляет в среднем 0,50-0,56 м. Для таких участков разработана технологическая схема слоевой бесцеликовой выемки с вовлечением в отработку этого слоя. В данной технологической схеме верхний слой (IV, IV-V, V, V-VI, VI) обрабатывается селективным способом с оставлением в выработанном пространстве разрушенных слоев IV-V, V и V-VI, а нижний слой (II, II-III, III) – валовым или селективным способом в зависимости от мощности слоя.

4. Разработанные для Краснослободского рудника технологические схемы слоевой бесцеликовой выемки Третьего калийного пласта могут быть использованы и на других шахтных полях Старобинского месторождения со схожими горно-геологическими условиями.

5. Для участков шахтного поля с замещением II и III сальвинитовых слоев каменной солью предложены две технологические схемы бесцеликовой выемки IV сальвинитового слоя с обратным порядком отработки панелей.

В первой схеме бесцеликовая выемка достигается проходкой вентиляционного штрека лавы вприсечку к выработанному пространству опережающей смежной лавы, а во второй схеме – аналогично отработке IV сальвинитового слоя при слоевой выемке пласта.

6. В случае замещения II и III сальвинитовых слоев на отдельных участках по длине панели рекомендуется применять комбинированную систему разработки с выемкой IV сальвинитового слоя лавой, а слоев II, II-III и III – камерами с использованием проходческо-очистного комплекса типа Урал-10КС. Для отработки панелей с повышенным извлечением запасов из недр выемка IV сальвинитового слоя ведется с оставлением межстолбовых целиков шириной не более 10 м с повторным использованием транспортного штрека лавы, а подготовка и очистная выемка слоев II, II-III, III – по панельной схеме с расположением всех подготовительных выработок в пределах выемочных столбов верхних лав. Такая система разработки позволяет производить выем-

ку нижней части пласта только на тех участках панели, где имеются II и III сильвинитовые слои, и обходить участки, где эти слои замещены галитом.

Список использованных источников

1. **Петровский, Б.И.** Основные направления совершенствования технологических схем подготовки длинных очистных забоев на рудниках РУП ПО «Беларуськалий» / Б.И. Петровский, П.И. Калиниченко, О.Г. Гринкевич, В.Н. Чужов // Горная механика. – 2002. – № 1. – С. 30-36.
2. **Петровский, Б.И.** Разработка пологих пластов лавами на калийных рудниках Республики Беларусь / Б.И. Петровский // Минеральные ресурсы и человек: сб. докл. междунар. науч.-техн. конф., Варна, 17-19 сент. 2002 г. – Варна, 2002. – Т. II. – С. 157-162.
3. **Петровский, Б.И.** Технологические схемы отработки калийных пластов Старобинского месторождения с повышенным извлечением запасов из недр / Б.И. Петровский, П.И. Калиниченко, Б.А. Волков // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии: тез. докл. науч. конф., Гродно, 25-26 июня 2002 г. – Гродно, 2002. – С. 83.
4. **Петровский, Б.И.** Перспективы применения бесцеликовой выемки калийных пластов Старобинского месторождения / Б.И. Петровский, В.С. Зубович // Горный журнал. – 2003. – № 1. – С. 31-34.
5. Бесцеликовые технологические схемы слоевой выемки Третьего калийного пласта / Б.И. Петровский [и др.] // Вопросы геомеханики подземной добычи калийных солей: сб. статей горного информационно-аналитического бюллетеня. – М.: МГГУ. – 2003. – № 10. – С. 3-16.
6. Выполнить анализ проведенных исследований и разработать рекомендации по технологии ведения горных работ на Краснослободском руднике: отчет о НИР (заключит. по дог. № 01/10, этап 3) / ЧУП «Институт горного дела»; рук. Б.И. Петровский; исполн.: А.А. Гарнишевский [и др.]. – Солигорск, 2012. – 50 с. – № ГР 20101034.
7. Калийная промышленность Франции: обзорн. инф. / Развитие калийной промышленности. – М.: НИИТЭХИМ. – 1971. – Вып. 4. – 69 с.
8. Эволюция систем разработки калийных месторождений Эльзаса // Горнорудная промышленность. – ЭИ. – 1975. – № 38. – С. 5-10.
9. Инструкция по применению систем разработки на Старобинском месторождении. – Солигорск-Минск, 2010. – 152 с.

Golovaty I.I., Petrovsky A.B., Petrovsky Yu.B., Prushak V.Ja., Petrovsky B.I., Polyakov A.L., Garnishevsky A.A.

Long-term manufacturing schemes of the development and mining the Third potash seam in the mine field of the Krasnoslobodsky mine

On the bases of production experience and research results there are stated principles of manufacturing schemes construction of the development and mining the Third potash seam in the mine field of the Krasnoslobodsky mine. Manufacturing schemes of slice pillarless mining are developed. For the areas with substitution of II and III sylvinitic layers by mine salt the authors offer a combined system of mining and separated extraction of IV sylvinitic layer by long-pillar system.

Поступила в редакцию 07.05.2014 г.

УДК 622.25:004.925.84

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЛЕДОПОРОДНОГО ОГРАЖДЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ КРЕПИ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ

Иголка Д.А.¹, Иголка Е.Ю.¹, Лукша Е.М.², Кологривко А.А.¹¹ Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь² ОАО «Белгорхимпром», г. Минск, Беларусь

Приведены закономерности изменения прочностных характеристик массива горных пород в отрицательном температурном поле ледопородного ограждения. Оценено влияние изменяющихся в температурном поле прочностных характеристик пород на нагружение бетонной крепи.

Введение

Из всех применяемых в настоящее время специальных способов проходки шахтных стволов по степени научной обоснованности, уровню развития технических средств и технологии производства работ, длительности и систематичности использования надежным и универсальным является способ искусственного замораживания горных пород, что подтверждается практикой [1].

В частности, для проходки стволов калийных рудников в сложных гидрогеологических условиях способ замораживания является практически единственно применимым. Так, например, стволы Старобинского и Саскачеванского месторождений калийных солей, Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей пройдены с использованием способа замораживания. Исключением в условиях Верхнекамского месторождения является ствол № 1 СКРУ-1, построенный в 1930 г. с применением цементации горных пород, а также два ствола фирмы PotashCorp на месторождении New Brunswick, сооруженные в 2012 году.

Несмотря на большую накопленную базу исследований и практических знаний, аварийные ситуации, связанные с деформированием стенок стволов, и как следствие, приводящие к разрушению крепи и разрыву замораживающих колонок, имеют место в практике ведения горно-строительных работ. Решение возникающих вопросов находят в завышении мощности замораживания пород и промораживании всего контура шахтного ствола, что не является безопасным и эффективным с точки зрения нагружения крепи, оттаивания горных пород и высокой стоимости процесса заморозки.

Развитие научных знаний в области расчета крепи стволов, проводимых способом замораживания, исследований особенностей взаимодействия системы «монолитная бетонная крепь – замороженный породный массив» с учетом изменения свойств ледопородного ограждения (ЛПО) в переменном и постоянном температурном поле, формирующемся вокруг замораживающих колонок, является актуальной задачей в области строительства шахтных стволов на калийных рудниках.

Результаты исследований

Замораживание горных пород изменяет их физико-механические и прочностные свойства, определяет ряд особенностей в технологии проходки и креплении стволов. В формулы расчета крепи стволов, как одного из основных определяющих факторов безопасности конструкции, входят прочностные и деформационные характеристики

замороженных пород: предел прочности на сжатие, модуль деформации, коэффициент Пуассона, сцепление, угол внутреннего трения.

К исследованию принимались замороженные алевритовые породы на глубине 400 м при температуре замораживания -20 °С, характерные для стволов калийных рудников. Используются свойства образцов в естественном и замороженном состояниях. Проведены исследования нагрузок на крепь ствола от горных пород, свойства которых приняты при постоянной средней температуре ЛПО, и от пород с дифференцированными свойствами в переменном температурном поле ЛПО. Установлена приемлемость вычислений нагрузок по средней температуре ЛПО. Нагружения бетонной крепи, связанные с морозным пучением и реологией, не учитывались, их исследование является отдельной актуальной темой для анализа и изучения.

Исследование напряженного состояния крепи проведено с применением методов механики сплошной среды с использованием программного продукта РК-2, реализующего аналитическое решение методом коэффициентов передачи нагрузок [2] и рекомендуемого нормативными документами по проектированию подземных горных выработок.

Ниже представлены результаты расчета, в котором нагрузка на крепь воспринимается от замороженных пород по свойствам, соответствующим средней температуре ЛПО. Схема размещения замораживающих скважин и толщины ЛПО приведена на рисунке 1. Средняя температура ЛПО в замковой части определена по рекомендациям [3, 4]:

$$t_{\text{ср.з}} = \frac{t_{\text{ст}} \ln(d_2/l)}{2 \ln(d_2/d_1)} + \frac{t_3}{2} \left(\frac{\ln(l/d_1)}{\ln(d_2/d_1)} + 1 \right) = -4,36 \text{ °С}, \quad (1)$$

где $t_{\text{ст}} = -17$ – внешняя температура стенки замораживающей колонки, °С;

$l = 1,3$ – расстояние между замораживающими колонками, м;

$d_1 = 0,148$ – диаметр замораживающей колонки, м;

$d_2 = 5,2$ – внешний диаметр криогидратного цилиндра вокруг замораживающей колонки, м;

$t_3 = -1,3$ – температура замерзания пород, °С.

Средняя температура главной плоскости ЛПО:

$$t_{\text{ср.г}} = \frac{t_{\text{ст}}}{\ln(r_2/r_1)} + \left(1 + \frac{1}{\ln(r_2/r_1)} \right) \cdot t_3 = -6,42 \text{ °С}, \quad (2)$$

где $r_1 = 0,074$ – радиус замораживающей колонки, м;

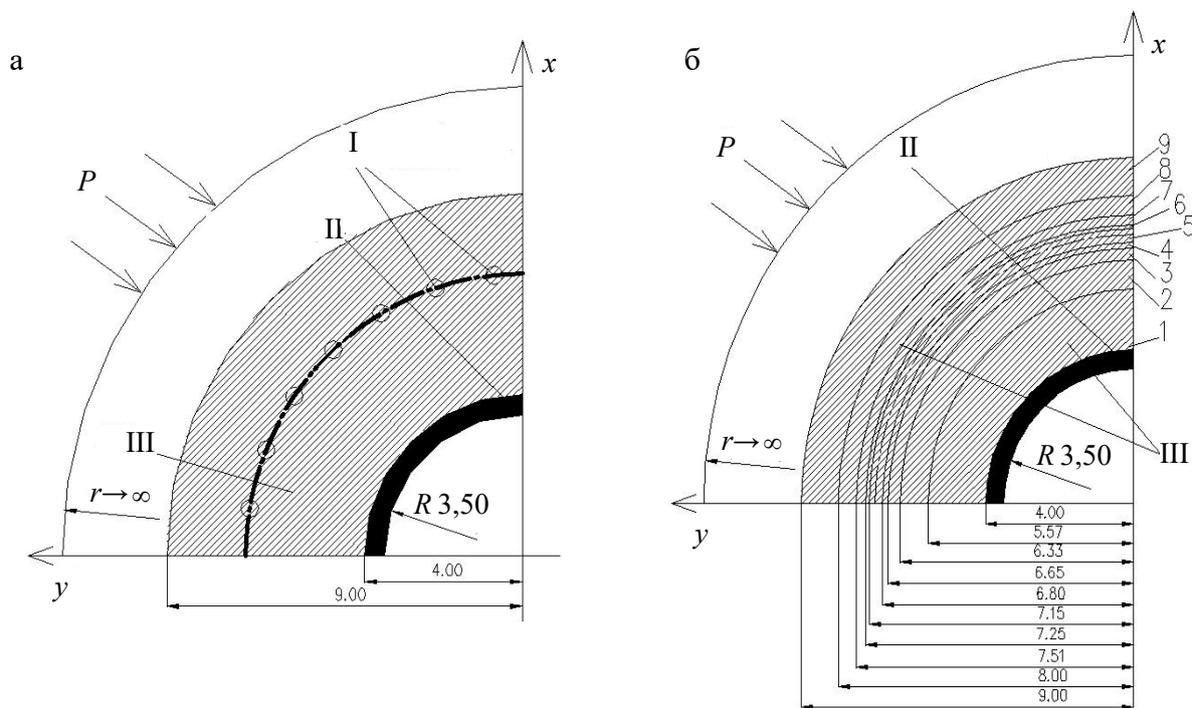
$r_2 = 2,063$ – радиус криогидратного цилиндра вокруг замораживающей колонки, м.

Средняя температура ЛПО:

$$t_{\text{лпо}} = \frac{t_{\text{ср.з}} + t_{\text{ср.г}}}{2} = -5,4 \text{ °С}. \quad (3)$$

Средняя температура ЛПО использована для дальнейшего определения расчетных величин прочностных характеристик пород. К расчетам нагрузок на крепь приняты свойства породы при температуре $-5,4$ °С (модуль деформации ЛПО – 495 МПа, коэффициент Пуассона – 0,12). Бетон принят толщиной 0,5 м, модуль деформации с учетом

молодого возраста – 13500 МПа. Модуль деформации пород – 195 МПа, коэффициент Пуассона – 0,22. Расчетная схема представлена на рисунке 1а.



а – по средней температуре ЛПО; б – в переменном температурном поле ЛПО;
1-9 – расчетные интервалы через каждые 6,8 °С; I – замораживающие колонки;
II – бетонная крепь; III – ЛПО; P – радиальная нагрузка на ЛПО

Рисунок 1 – Схема расчета нагрузок на крепь

Коэффициент, учитывающий влияние расстояния до забоя ствола, принят согласно формуле разработанной профессором Н.С. Булычевым [2]. Расчетная величина начальных напряжений составляет 0,83 МПа.

В результате расчета по средней температуре ЛПО нормальные тангенциальные напряжения на внутреннем контуре сечения крепи составляют 7,67 МПа, а напряжения на наружном контуре 6,77 МПа, что не превышает расчетного сопротивления сжатия бетона [5]. При этом радиальное напряжение на контакте крепи и породы составит 0,9 МПа.

Для определения нагрузок на крепь от замороженных пород с учетом переменной температуры в ЛПО по логарифмической зависимости [2] построен график распределения температур в ЛПО толщиной 5 м (рисунок 2), с учетом распределения толщины d ЛПО: $0,6d$ к центру ствола и $0,4d$ к его внешней части.

Температура в любой точке ЛПО радиусом R_t определена по формуле:

$$t(R_t) = t_k \cdot \left(\frac{\ln(R_{\text{вн}} / R_t)}{\ln(R_{\text{вн}} / R_0)} \right), \quad (4)$$

где t_k – температура поверхности замораживающей колонки, °С;

$R_{\text{вн}}$ – радиус промерзания ледопородных цилиндров, °С;

R_t – расстояние рассматриваемой точки от оси замораживающей колонки, м;
 R_0 – внешний радиус замораживающей колонки, м.

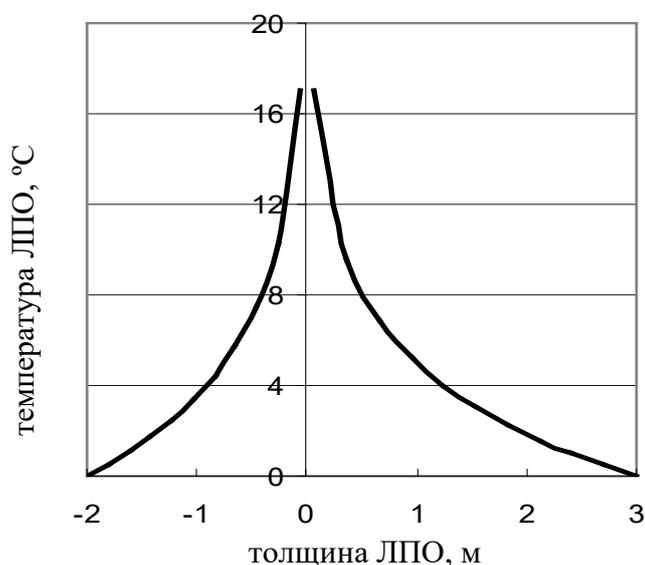
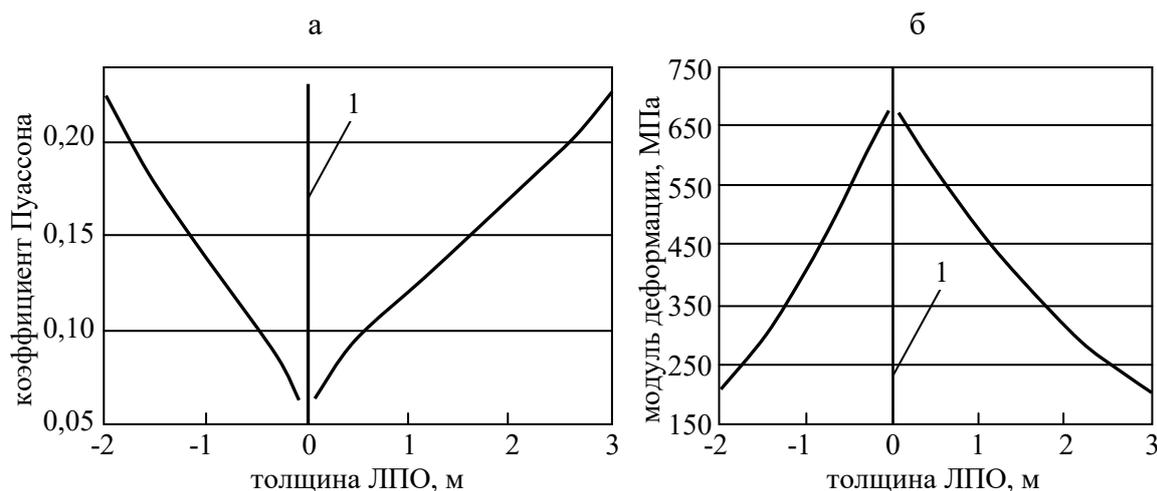


Рисунок 2 – График распределения температур в ЛПО

При выполнении расчета допущено, что температура ледообразования $t_0 = 0$ °С и соответствует температуре на стенке ствола при его проходке. Далее согласно физико-механическим свойствам пород при отрицательных температурах построены графики изменения модуля деформации и коэффициента Пуассона, соответствующие температурному полю ЛПО, (рисунок 3) и определены закономерности изменения коэффициента Пуассона и модуля деформации замороженных пород в отрицательном температурном поле.



1 – замораживающая колонка

Рисунок 3 – Графики зависимости коэффициента Пуассона (а) и модуля деформации (б) от отрицательного температурного поля ЛПО

Для исследования нагрузки на бетонную крепь от переменного температурного поля ЛПО использовано решение программы РК-2. При разделении температурного

поля ЛПО через каждые 6,8 °С имеем 9 расчетных интервалов. Слои ЛПО приняты в качестве аналога многослойной крепи. Расчетная схема представлена на рисунке 1б. Внутри каждого выделенного интервала путем линейной интерполяции определялась средняя температура каждого слоя. По полученным графическим закономерностям в соответствии с температурой расчетных интервалов ЛПО определены значения коэффициента Пуассона и модуля деформации для каждого расчетного слоя.

В результате расчета нормальные тангенциальные напряжения на внутреннем контуре сечения крепи составили 6,95 МПа, напряжения на наружном контуре – 6,16 МПа.

Расчет с учетом дифференцированных свойств пород показал, что напряжения в конструкции примерно на 10 % меньше, чем при расчете крепи по средней температуре ЛПО.

Методы механики сплошной среды применительно к механике подземных сооружений в настоящее время достаточно развиты [6]. Это позволяет выполнять аналитические расчеты по обоснованию параметров различных типов крепи шахтных стволов при воздействии на них как статических нагрузок – горное давление, морозное пучение, так и динамических – сейсмическое воздействие, тампонажные работы.

На современном этапе изучения методов расчета крепи в замороженных породах при строительстве стволов на калийных рудниках отсутствует методика расчета, которая бы учитывала нагрузки на крепь ствола сил морозного пучения, реологических параметров замороженных пород, переменных свойств массива пород, а также поведение материалов крепи в условиях отрицательных температур. В связи со сложностью термодинамических и геомеханических процессов, происходящих в массиве при реализации метода замораживания пород, представляется возможным привлечение численных методов с построением цифровых моделей, позволяющих решать комплексные задачи. Такие методы моделирования получили название ТНМС (метод Thermal-Hydrological-Mechanical-Chemical) [7], учитывающие механические, термические, гидравлические и химические свойства массивов, а такие программные продукты как ANSYS, FLAC позволяют выполнять постановку задач такого рода [8]. Использование таких методов моделирования в сочетании с постоянным мониторингом напряженно-деформированного состояния системы «монолитная бетонная крепь – замороженный породный массив» обеспечит безопасность проходки, позволит эффективно оптимизировать дорогостоящие процессы замораживания пород и крепления стволов.

Заключение

Исследование нагрузок на крепь стволов от горных пород, характерных для калийных рудников, свойства которых приняты при средней (постоянной) температуре ЛПО, и от пород с дифференцированными свойствами в переменном температурном поле ЛПО показывают, что напряжения в конструкции крепи примерно на 10 % меньше, чем при расчете крепи по средней температуре ЛПО. Использование при расчете крепи шахтных стволов, проводимых способом замораживания, средней температуры ЛПО согласуется с результатами расчетов, учитывающих изменения деформационных свойств пород ЛПО от изменения температуры.

Список использованных источников

1. **Schmall, P.** Ground freezing a proven technology in mine shaft sinking / P. Schmall, D. Maishman // T&UC. – London, June 2007. – 2007. – P. 25-30.

2. Булычев, Н.С. Механика подземных сооружений / Н.С. Булычев. – М.: Недра, 1994. – 278 с.
 3. Литвин, А.З. Проходка стволов специальными способами / А.З. Литвин, Н.М. Поляков. – М.: Недра, 1974. – 328 с.
 4. Трупак, Н.Г. Замораживание грунтов при строительстве подземных сооружений / Н.Г. Трупак. – М.: Недра, 1979. – 278 с.
 5. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск, 2003. – 39 с.
 6. Булычев, Н.С. О расчете крепи ствола при проходке способом замораживания пород / Н.С. Булычев // Геомеханика. Механика подземных сооружений. Выпуск 3. – Тула: ТулГУ, 2001. – С. 42-46.
 7. Yu-Shu, Wu. Development of Advanced Thermal-Hydrological-Mechanical-Chemical (THMC) Modeling Capabilities for Enhanced Geothermal Systems / Wu. Yu-Shu // Geothermal Technologies Programm. – Colorado School of Mine, 2010.
 8. Иголка, Е.Ю. Применение численного моделирования для оценки влияния криогенного пучения на крепь при проходке шахтных стволов способом замораживания / Е.Ю. Иголка, В.С. Усенко, Г.А. Щербаков // V-th International Geomechanics Conference. – Варна (Болгария), 2012.
-

Igolka D.A., Igolka E.Yu., Luksha E.M., Kologrivko A.A.

Influence of an ice wall temperature at calculation of the shafts lining system

Regularities of changing of rock mass strength characteristics are given within a negative temperature field of an ice-wall massif. It is estimated the influence of rock strength characteristics changing within the temperature field on loading of a concrete lining system.

Поступила в редакцию 05.06.2014 г.

УДК 622.363.2.063.44(476)(047)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СЕЛЕКТИВНОЙ ВЫЕМКИ КАЛИЙНОЙ РУДЫ НА СТАРОБИНСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

Хлебко А.А., Шутин С.Г., Плескунов В.Н., Морев А.Б. (ОАО «Белгорхимпром», г. Минск, Беларусь)

В статье приведены предложения по совершенствованию селективной выемки калийных пластов на Старобинском месторождении. Даны рекомендации по технологии закладки бутовых (закладочных) полос в наиболее рациональных местах по длине лавы.

Предложено существенное снижение энергопотребления и пылеобразования в лаве за счет замены роторных метателей закладочным конвейером с разгрузочными окнами и дистанционно управляемыми заслонками.

Предлагаемые закладочные технология и оборудование позволяют существенно повысить производительность селективного комплекса и снизить затраты на добычу полезного ископаемого.

Введение

Выемка запасов калийных солей на Старобинском месторождении ведется в основном длинными очистными забоями (лавами). Вынимаемые пласты состоят из слоев полезного ископаемого (сильвинита) и породы (галита). Наиболее эффективная их разработка возможна по селективной технологии, суть которой заключается в раздельной выемке в забое полезного ископаемого и породы. Полезное ископаемое доставляют на поверхность для переработки, а породу оставляют в лаве и складировать ее в виде бутовых (закладочных) полос. Несмотря на очевидные технологические преимущества, селективная выемка не получила широкого распространения на рудниках ОАО «Беларуськалий» из-за ряда существенных недостатков.

В настоящее время в селективных лавах повсеместно используются для закладки породы в выработанное пространство лавы роторные метатели. Роторный метатель выполнен в виде установленного под углом 15° к опорной раме быстро вращающегося роторного колеса (735 об/мин). При встрече с лопастями поступающий с перегружателя закладочный материал меняет направление движения и приобретает скорость до 32 м/с. В процессе приобретения частицами кинетической энергии происходит их перемещение на длину около 15 м и интенсивное измельчение с выделением большого количества пылеобразующих фракций, которые вентиляционной струей направляются в лаву. Необходимо отметить, что этому процессу подвергается до 30 % от общего объема добываемой из лавы руды, что приводит к дополнительному расходу электроэнергии (мощность привода роторного метателя – 55 кВт).

Следует отметить, что первый селективный комбайн фирмы «Айкхофф» был поставлен с метателями, выполненными на базе специального ленточного конвейера с повышенной скоростью движения ленты специальной конфигурации. При аналогичных технических параметрах пылевая обстановка в лаве была более благоприятная. Однако, из-за низкой долговечности ленты ленточный метатель был заменен на метатели роторного типа.

Нерациональная технология ведения закладочных работ в лаве обусловлена тем, что метатели устанавливаются на сопряжении лавы с подготовительными выработка-

ми. Это определяет формирование бутовых полос по числу сопрягаемых штреков (подготовительных выработок) с лавой. В лавах длиной до 240 м обычно это боковые и средний вентиляционный штреки. В лавах длиной 240 м и более, а также в лавах с двумя породными прослоями не представляется возможным разместить извлекаемую породу в трех бутовых полосах на сопряжении лавы с указанными штреками. Для установки дополнительных метателей, соответственно, проходят дополнительные выработки (штреки) [1]. Это, в свою очередь, приводит к следующим недостаткам:

- существенному повышению затрат и времени на подготовку добычного участка;
- повышению трудоемкости работ на сопряжении лавы с дополнительными выработками при подготовительных и добычных работах;
- снижению качества руды при ведении подготовки добычного участка.

Изложенное позволяет сделать вывод о том, что технология закладочных работ с использованием роторных метателей из-за их принципиальных недостатков крайне несовершенна. Однако, роторные метатели применяются не только в действующих селективных лавах, но и закладываются в разрабатываемые проекты.

Технология закладочных работ при селективной выемке калийной руды

Промышленное внедрение селективной выемки было осуществлено на руднике 2 РУ ПО «Беларуськалий» в 1990 г. комбайном ЭДВ-300/760-Л-230СВ (авторское свидетельство № 1553670 от 14.09.1989 г.) [2].

Длительный опыт селективной выемки на рудниках объединения показал, что наиболее несовершенным звеном в селективном комплексе являются закладочное оборудование и технология. Несовершенство технологии закладки подтверждается также использованием в селективных лавах для пылеподавления систем орошения, что при наличии большого объема пылевидных фракций в атмосфере в забое может оказаться неэффективным мероприятием.

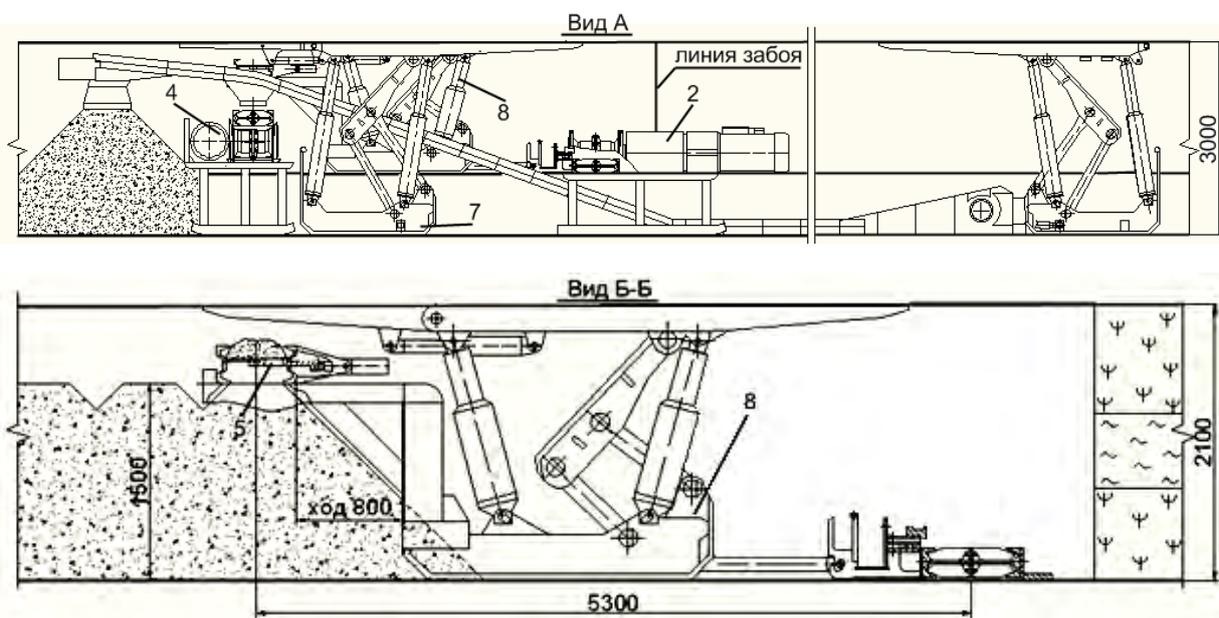
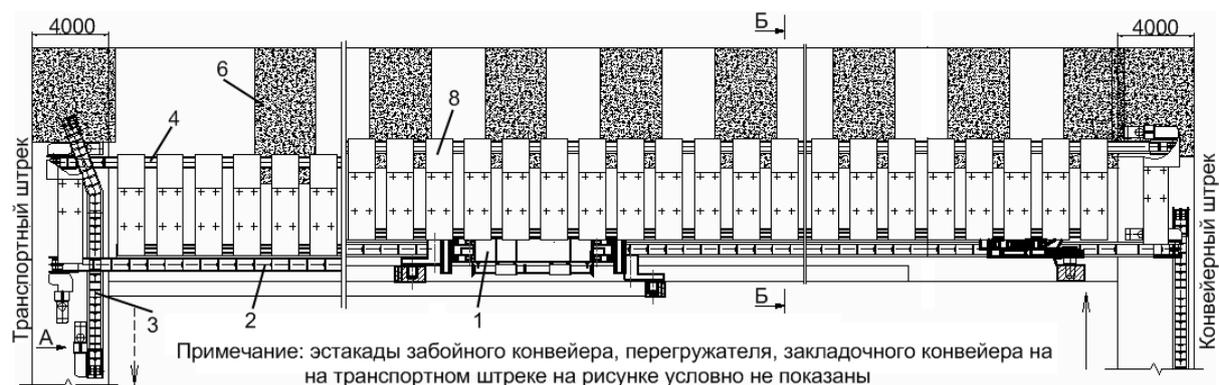
Предлагается комплекс оборудования для селективной выемки калийной руды, принципиальное отличие которого от существующих заключается в оснащении его более совершенной системой закладки выработанного пространства [3].

Техническая сущность предложения заключается в том, что наиболее несовершенное оборудование – роторные метатели – исключено из состава закладочного комплекса, а для доставки закладочного материала и формирования бутовых полос применяется изгибающийся закладочный конвейер – скребковый конвейер с разгрузочными окнами, оснащенными дистанционно управляемыми заслонками.

Рациональное расположение разгрузочных окон по длине лавы и, соответственно, бутовых полос определяется конкретно для каждой лавы в зависимости от ее длины, количества извлекаемых слоев, их мощности и других параметров.

Конструкция селективного комплекса и технология его работы приведена на рисунке. Отличительные особенности основного забойного оборудования заключаются в следующем:

- забойный конвейер 2 не имеет разгрузочных окон для перегрузки породы на перегружатели и далее – к метателям;
- закладочный конвейер 4 соответствует длине лавы и в местах расположения бутовых полос 6 оборудуется разгрузочными окнами 5 с дистанционно управляемыми заслонками. Разгрузочное окно выполнено также в месте пересечения перегружателя 3 с закладочным конвейером. Для локализации пыли в месте формирования бутовых полос разгрузочные окна оборудуются гибкими кожухами.



- 1 – комбайн; 2 – забойный конвейер; 3 – перегружатель; 4 – закладочный конвейер;
 5 – разгрузочное окно с дистанционно управляемой заслонкой; 6 – бутовая полоса;
 7 – крепь сопряжения; 8 – забойная крепь

Рисунок – Комплекс оборудования для селективной выемки калийных руд

Став закладочного конвейера располагается на забойной крепи 8 со стороны выработанного пространства.

Приводы закладочного конвейера располагаются на бортовых штреках.

Забойная крепь 8 может быть выполнена на базе крепи сопряжения. Крепь отличается тем, что со стороны выработанного пространства она оборудуется кронштейнами, на которых располагается став закладочного конвейера с разгрузочными окнами, который имеет возможность перемещаться в поперечном отношении лавы направлению на величину, равную шагу передвижки крепи. Возможное перемещение става конвейера ограничивается установленными на кронштейнах фиксирующими элементами.

Перегружатель 3 типовой конструкции предназначен для перегрузки на транспортном штреке закладочного материала с забойного на закладочный конвейер.

Технология селективной выемки и конструкция комбайна принимаются по аналогии с существующими.

Став закладочного конвейера располагается на высоте, достаточной для прохода грузовой ветви конвейера под кровлей лавы. В месте перегрузки породы на закладочный конвейер его став в пределах допустимого изгиба в вертикальной плоскости располагается ниже на величину, достаточную для организации разгрузочного пункта.

Безопасность обслуживания закладочного конвейера обеспечивается путем выполнения специальных мероприятий, аналогичных обслуживанию роторных метателей.

Закладочные работы ведутся по следующей технологии.

В процессе выемки породного прослоя комбайном 1 порода грузится на забойный конвейер 2 и направляется на перегружатель 3, расположенный на транспортном штреке. Далее порода поступает на закладочный конвейер 4 к первому разгрузочному окну 5. После формирования фронта бутовой полосы 6 разгрузочное окно 5 дистанционно закрывается и порода поступает к следующему окну. Для закладки транспортного штрека разгрузочное окно на перегружателе закрывается. Для закладки конвейерного штрека закрываются все разгрузочные окна закладочного конвейера 4. Крепь сопряжения 7 и забойные крепи 8 задвигаются к забою. Затем цикл повторяется.

Сравнительная характеристика закладочных комплексов с роторными метателями и закладочным конвейером с разгрузочными окнами выполнена путем сопоставления их конструктивных и технологических особенностей. Состав основного оборудования комплексов приведен в таблице.

Таблица – Перечень основного оборудования закладочных комплексов с роторными метателями и закладочным конвейером с разгрузочными окнами

№ п/п	Наименование оборудования и основных составляющих частей	Закладочный комплекс	
		существующий	предлагаемый
1	Забойный конвейер, $L = 240$ м, шт. 1.1. Разгрузочные окна, шт.	1	1
		2	-
2	Роторный метатель в сборе, шт. 2.1. Металлоконструкция, шт. 2.2. Электрическая пусковая аппаратура, кабели, компл. 2.3. Гидравлическая аппаратура, шланги, компл. 2.4. Электропривод, 55 кВт, шт.	4	-
		4	-
		4	-
		4	-
		4	-
3	Закладочный конвейер, шт. 3.1. Конвейерный став, $L = 240$ м, шт. 3.2. Электропривод, 55 кВт, шт. 3.3. Разгрузочные окна, шаг $L = 8$ м, шт. 3.4. Электрическая пусковая аппаратура, кабели, компл. 3.5. Металлоконструкция, шт.	-	1
		-	1
		-	2
		-	30
		-	1
		-	2
4	Перегружатель, шт. 4.1. Конвейерный став, $L = 15$ м, шт. 4.2. Электропривод, 55 кВт, шт.	4	1
		4	1
		4	1
5	Крепь сопряжения, шт.	8	2
6	Устройства перекрытия штрека на сопряжении, (эстакада), шт.	2	-
7	Система орошения закладочного комплекса, шт.	2	-
8	Гидропередвижник, шт.	2	-
<p><i>Примечание:</i> 1. Длина лавы принята 240 м 2. Количество разгрузочных окон уточняется технологической схемой закладки 3. Добычный участок подготовлен двумя бортовыми штреками</p>			

В качестве базового варианта приняты параметры одной из проектируемых лав длиной 240 м с дополнительным штреком для складирования объема извлекаемой породы и закладки выработанного пространства по принятой технологии селективной выемки.

Заключение

Широкое внедрение селективной выемки калийных пластов во многом сдерживается из-за существенных недостатков, присущих закладочным технологиям и оборудованию.

К основным недостаткам, влияющим на общую оценку селективной выемки, можно отнести следующее:

- при использовании роторных метателей извлекаемая из лавы порода (до 30 % от общего объема добываемой руды) переизмельчается с образованием пылевых фракций. Высокая запыленность выработок добычного участка снижает эффективность работы обслуживающего персонала в лаве, что, в конечном счете, снижает производительность селективного участка;

- бутовые полосы формируют в местах сопряжения лавы со штреками. Это приводит к необходимости для размещения породы проходить в длинных лавах (более 200 м) дополнительные штреки, что ведет к существенному увеличению подготовительных работ и общих затрат на подготовку добычного участка, а также к снижению качества руды;

- как видно из приведенной таблицы, существующее закладочное оборудование и электротехнические устройства более сложны по сравнению с предлагаемым;

- забойный конвейер в местах сопряжения со штреками оборудуется разгрузочными окнами и должен иметь перепад по высоте между почвой лавы и штреком, что требует в этих местах перекрытий (эстакад) для опоры става забойного конвейера.

Отмеченные недостатки устранены в предлагаемом комплексе.

Авторы готовы обсудить со специалистами приведенные в статье технические решения.

Список использованных источников

1. **Кириенко, В.М.** Опыт селективной выемки калийных пластов на Старобинском месторождении / В.М. Кириенко, В.Н. Плескунов, В.Н. Чужов // Горный журнал. – 2003. – № 7. – С. 52.

2. **Калугин, П.А.** Горные машины фирмы «Айкхофф» на калийных рудниках Беларуси / П.А. Калугин, А.Б. Морев. – ГНПМП: «Информпрогресс», 1994 г.

3. Устройство для закладки выработанного пространства лавы: пат. 9693 Респ. Беларусь, МПК E21F15/06 / А.А. Хлебко, С.Г. Шутин, В.Н. Плескунов, В.А. Тараканов, А.Б. Морев; заявитель ОАО «Белгорхимпром». – № и 20130421; заявл. 20.05.13; опубл. 30.10.13 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 5. – С. 209.

Khlebko A.A., Shutin S.G., Pleskunov V.N., Morev A.B.

Improvement of selective mining of potassium ore in the Starobin deposit

The article presents suggestions on improvement of selective mining of potassium seams in the Starobin deposit. The recommendations are given on technology of strip packing in the most appropriate places within the long face.

There are stated ways of lowering power consumption and dusting in the long face by substitution of rotary throwers by a stowing conveyer with discharge holes and remotely-operated shutters.

The considered technologies and equipment permit essentially to increase productivity of a selective complex and to reduce costs for extraction of minerals.

Поступила в редакцию 26.06.2014 г.

УДК 622.331.012-021.431(047)(476)

РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕСТНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

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

Рассматривается вопрос о перспективах рационального использования местных минеральных ресурсов и о перспективах эффективного использования торфа в энергетических целях. Показано, какая работа проводится в Республике Беларусь в рамках реализации Государственной программы «Торф» и ГПНИ «Разработка научных основ экологобезопасной технологии получения пористых строительных материалов с использованием местных видов топлив и вторичных энергоресурсов», обозначены направления, необходимые для реализации плана увеличения использования торфа в энергетических целях.

Введение

В настоящее время в Беларуси активно развиваются исследования, направленные на экономию технологического привозного топлива, при одновременной замене дефицитных видов на местные, например, торф, сапрпель, промышленные отходы, содержащие значительное количество органических веществ (лигнин, древесные опилки и др.)

Повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов и создание необходимых условий для перевода экономики страны на энергосберегающий путь развития – одна из приоритетных задач государственной энергетической политики Республики Беларусь.

Решение проблемы обеспечения страны энергоресурсами в настоящее время рассматривается в двух направлениях:

- повышение эффективности использования существующих энергоносителей;
- разработка и внедрение новых перспективных способов производства энергоресурсов с учетом имеющейся в стране сырьевой базы [1].

Для обеспечения энергетической безопасности Республики Беларусь предусматривается к 2020 году обеспечить производство 25 % тепловой и электрической энергии за счет использования местных, возобновляемых и альтернативных источников энергии.

Торф и древесное топливо являются наиболее востребованными в малой энергетике и сельском хозяйстве топливно-энергетическими ресурсами. Поэтому к 2020 году доля торфа в общем объеме котельно-печного топлива должна составить не менее 4,3 %. Для сравнения: доля торфяного топлива при производстве электроэнергии в Финляндии составляет более 5 %, тепловой энергии – более 17 %.

По оценкам специалистов в Беларуси общая площадь торфяного фонда составляет 2,4 млн. га с геологическими запасами около 4 млрд. тонн торфа. Мировой опыт использования торфа, широкая распространенность ресурсов торфа в Беларуси доказывают необходимость повышения эффективности и объемов использования этого природного сырья в энергетике.

При агломерации силикатного сырья замена антрацита штыба на местные виды топлива является актуальной проблемой, однако, использование топлива с малой теп-

лотворной способностью требует разработки способов более эффективного их сжигания в агломерируемом слое шихты.

Выявлен ряд общих закономерностей, характерных для агломерации шихт как на основе глинистого, так и железорудного сырья. По мере уменьшения крупности топливных частиц заметно повышается восстановительный потенциал продуктов горения и снижается высота окислительной зоны. Так, снижение крупности топлива с 7,2-9 мм до 4,8-6,0 мм привело к уменьшению степени использования углерода с 7 до 14 %. Аналогичные результаты приводятся по данным при сжигании топлива различной крупности с одновременным замером температур в слое и состава отходящего газа. С повышением крупности топлива абсолютные температуры в зоне горения возрастают, а газовая фаза обогащается двуокисью углерода. Теоретические расчеты также приводят к выводу о снижении температурного уровня процесса при использовании мелкого топлива в сравнении с более крупным.

По степени углефикации можно прогнозировать возможную скорость спекания шихты, а, следовательно, и скорость горения топлива на основе тех или иных отходов углеобогащения. Так, низкометаморфизованные отходы с содержанием углерода в горючей массе менее 75 % позволяют (при прочих оптимальных условиях) достичь вертикальной скорости спекания шихты 13-23 мм/мин; среднеметаморфизованные отходы с содержанием углерода в горючей массе 75-90 % – 8-15 мм/мин; высокометаморфизованные отходы с содержанием углерода в горючей массе более 90 % – 4-10 мм/мин.

При спекании суглинков с использованием углей с содержанием летучих до 28-30 % процесс агломерации интенсифицируется. При увеличении же содержания летучих в углях свыше 28-30 %, например до 37 %, процесс агломерации замедляется. И в первом случае, и во втором наблюдается значительный унос летучих в газоходы. Изучение химической активности и процессов газообразования при сжигании топлива различного вида в агломерируемом слое шихты показало, что с ростом химической активности топлива и с уменьшением его крупности восстановительная способность продуктов горения усиливается, что находит свое выражение в увеличении отношения CO/CO_2 . Вышеприведенные закономерности указывают на целесообразность использования как торфа, так и сапропелей в качестве технологического топлива при рациональных способах их окускования и сжигания летучих [2].

Исследование получения аглопоритового щебня и песка с использованием фрезерного торфа

На аглопоритовых предприятиях в качестве технологического топлива с малой теплотворной способностью применяется каменный и бурый уголь. По данным [2] характеристика бурого угля следующая: марка угля – Б2, содержание серы на рабочую массу – 1-2 %; содержание углерода на рабочую массу – 41,1 %; содержание водорода на рабочую массу – 2,4 %; содержание азота на рабочую массу – 9,1 %; влажность на рабочую массу – 36 %; зольность на рабочую массу – 10 %; выход летучих на рабочую массу – 33 %; низшая теплота сгорания – 3380 ккал/кг.

При замене антрацита топливом с содержанием 28-30 % летучих процесс агломерации суглинков интенсифицируется, и зона горения растягивается. При увеличении содержания летучих в углях более 28-30 % процесс агломерации замедляется. Качественная характеристика аглопорита, спекаемого с различными видами технологического топлива, практически не изменяется.

Однако при замене антрацита топливом с большим содержанием летучих часть их не успевает сгореть. Поэтому использовать топливо с большим содержанием лету-

чих по общепринятой технологии производства аглопорита с учетом экологических соображений нецелесообразно. Однако применение смеси топлива, состоящей из одной части антрацита и двух частей угля с большим содержанием летучих, за счет повышения температуры горения топлива в слое позволило добиться большей полноты сгорания летучих.

Анализ теплотехнических характеристик торфа позволяет допустить использование торфа как технологического топлива при производстве аглопорита. Например, теплота сгорания горючей массы торфа колеблется от 3500 до 3700 ккал/кг, т.е. в сравнительно незначительных пределах. Теплота сгорания рабочей массы торфа колеблется в широких пределах в зависимости от влажности массы и ее зольности.

Оптимальная влажность сырьевой смеси зависит от вида применяемого торфа. Высота укладываемого слоя для шихты с применением торфа не превышает 310 мм, что сказывается на скорости ее спекания. Разрежение при агломерации составляет 0,02 МПа.

Температура зажигания шихты 1000-1100 °С. Расход газа при этом не увеличивается. Вертикальная скорость спекания шихты составляет 4-6 мм/мин. Съем продукции по составам шихты составил 180-210 кг/м² с учетом выхода недожога.

Полученные аглопоритовый щебень и песок с применением фрезерного торфа и древесных опилок по показателям прочности и плотности соответствовали требованиям стандарта, согласно которому по показателям насыпной плотности аглопоритовый щебень и песок относят: фракция 20-40 мм и 10-20 мм к марке 600; фракция 5-10 мм к марке 700; фракция менее 5 мм к маркам 1000-1100. По показателям прочности аглопоритовый щебень относится: фракция 20-40 мм и 10-20 мм к марке 75; фракция 5-10 мм к марке 200-250. Полученные нами аглопоритовый щебень и песок практически по всем качественным показателям близки к показателям продукции с использованием обычной шихты. Представляет также практический интерес использование в технологии увеличение крупности частиц (фракционного состава) торфа до 10 мм с целью повышения его массы, что вызовет повышение температуры в спекаемом слое, изменение режимов полукоксования торфа и параметров агломерационного процесса, в частности, выхода недожога.

Большое значение имеет также изучение качественных показателей аглопорита, спекаемого с различными видами технологического топлива, в которых различное содержание летучих веществ, что может увеличить выход недожога и повлиять на экологическую обстановку территории [3].

Работа действующих аглопоритовых предприятий, которые используют в качестве технологического топлива низкосортные угли, позволяет рекомендовать проведение исследований по разработке технологических параметров производства аглопорита при замене угля и древесных опилок на местные виды топлива (фрезерный торф – топливный, для компостирования, топливные дробленые брикеты, сапропель и др.). Следует сказать, что сапропелевые коллоидные отложения содержатся во многих пресноводных водоемах Беларуси и содержат до 93 % органических веществ. Сейчас их добыча носит промышленный характер, и применение сапропелей возможно не только в сельском хозяйстве, но и в производстве легких заполнителей для аглопорита.

Опыт показывает, что неудачное конструктивное решение или неправильный режим охлаждения шихты приводит к низкому качеству полученного спекшегося прочного пористого конгломерата. Особое значение приобретает теплофизическое обоснование рациональных режимов охлаждения. В связи с этим актуальной задачей является исследование распределения поля температур внутри шихты в зависимости от

различных скоростей движения ленты агломерационной машины, а, следовательно, от времени охлаждения.

Математическая модель процессов охлаждения с движущейся лентой в общем случае должна содержать сопряженные системы уравнений, описывающие различные физические процессы: затвердевание шихты; оплавление поверхности; перераспределение примесей, газов и др. Недостаточная изученность ряда физических явлений, сложность системы дифференциальных уравнений вынуждают упростить математическую формулировку задачи, описывающую охлаждение шихты.

В последнее время наблюдается тенденция изучения динамики затвердевания с помощью численных методов решения краевых задач для уравнения теплопроводности. Этот подход связан со значительными затратами времени на составление и отладку программ. Однако во многих случаях реальных теплотехнологических процессов не требуется та высокая степень точности, которую дают аналитические либо численные методы моделирования. В таких случаях можно воспользоваться упрощенными, так называемыми, инженерными способами расчетов, позволяющими проектировщику или технологу с достаточной для практических целей степенью точности определить технологически важные параметры процесса.

При исследовании процесса охлаждения шихты после расплава и сгорания вкраплений необходимо знать: как перемещается в расплаве фронт затвердевания, как распределяются температуры в сечении твердой корки и каково время окончания затвердевания.

Процесс спекания шихты в производстве аглопорита с применением агломерационной машины делится на 4 этапа.

1. Испарение гигроскопической влаги при температурах до 100 °С.
2. Подогрев слоя шихты при температуре от 100 до 800 °С (в этот период происходит дегидратация глинистых минералов и гидроокислов железа).
3. Воспламенение топлива, находящегося в шихте (в этот период при температуре 800-1600 °С железные окислы восстанавливаются до закисного состояния и способствуют образованию жидкой фазы, происходит спекание зерен внутри отдельных частиц и контактное спекание их между собой, в результате сыпучий слой превращается в спекшийся пористый конгломерат).
4. Охлаждение конгломерата (в этот период завершаются процессы кристаллизации магнетита и α -кristобалита, α -кварц переходит в β -кварц, при этом кристаллическими фазами являются: кварц, полевой шпат, кристобалит и муллит).

Сейчас в Республике идет развитие исследований по экономии технологического топлива и замене дефицитных и дорогостоящих импортных на местные виды, такие как различные виды торфа, сапрпель, отходы торфобрикетного производства, которые имеют высокую теплоту сгорания и содержат значительное количество органических веществ. При использовании силикатного сырья или утилизации вскрышных пород в агломерации замена импортных видов топлива на местные являются актуальной проблемой, а использование топлива с низкой теплотворной способностью требует разработки новых способов по обогащению, усреднению и определению оптимальных сырьевых составов с целью более эффективного их сжигания в агломерируемом слое шихты.

В цехе теплоизоляционных материалов ОАО «Минский завод строительных материалов» были проведены промышленные испытания щебня и песка аглопоритовых с использованием фрезерного торфа ОАО «Торфобрикетный завод Усяж», и выпущена опытная партия аглопорита в количестве 230 м³.

Технологические параметры до проведения испытаний:

- температура в пламенном пространстве горна 950-1000 °С;
- скорость агломерационной машины (по вариатору) 80 В;
- уголь на отметке 4, на вариаторе 60 В;
- опилки на отметке 2;
- зазор между валками камневыделительных вальцев 10 мм;
- зазор между валками вальцев тонкого помола 5-15 мм.

Состав шихты в % по массе:

- суглинки месторождения «Фаниполь» – 89,3 %;
- уголь марки АШ 0-6 мм – 7,8 %;
- древесные опилки – 2,9 %.

Суглинок месторождения «Фаниполь» согласно ГОСТ 9169-75 «Сырье глинистое для керамической промышленности. Классификация» в зависимости от содержания тонкодисперсных фракций (частиц менее 0,01 и менее 0,001 мм) относится к группе «грубодисперсные», в зависимости от пластичности – «малопластичные».

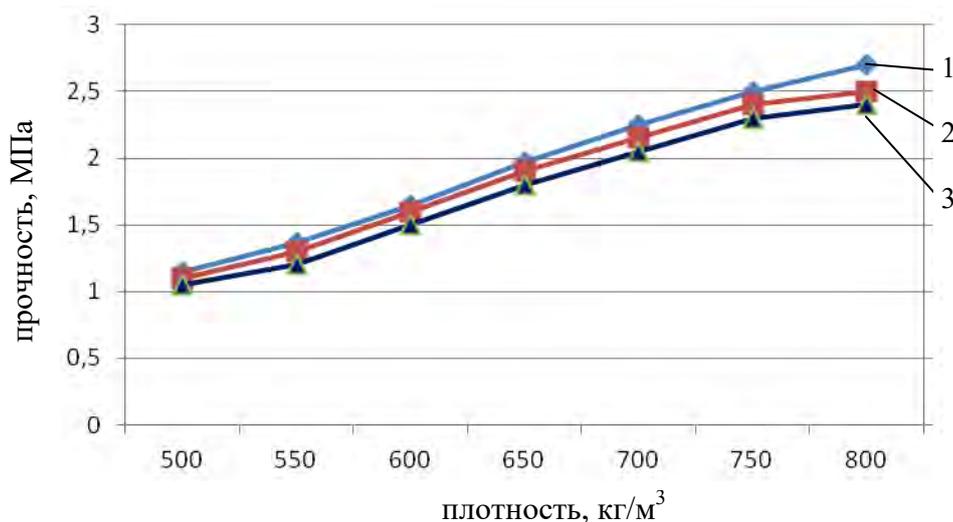
В процессе проведения испытаний контролировались следующие технологические параметры:

- дозировка компонентов шихты;
- влажность компонентов шихты;
- грансостав шихты;
- влажность шихты;
- скорость движения машины;
- высота слоя спекаемой шихты;
- разрежение в вакуум-камерах агломерационной машины.

Определялись:

- визуальная характеристика коржа со стороны разгрузки машины;
- качественные показатели полученного аглопорита.

Зависимость прочности аглопоритового щебня от его плотности при добавлении отходов торфяного производства и вскрышных пород показана на рисунке 1.



1 – с добавкой брикетов и суглинков; 2 – с добавкой торфа и суглинков; 3 – заводской
Рисунок 1 – Зависимость прочности аглопоритового щебня от его плотности при добавлении отходов торфяного производства и вскрышных пород

Здесь использовались вскрышные породы (суглинки) месторождения гравийно-песчаной смеси (ГПС) «Фаниполь», которые по физико-химическому составу могут использоваться для производства аглопорита. В качестве добавок использовался низинный фрезерованный торф степенью разложения 20 %, влажностью 50 %, зольностью 10 %. В состав брикетов входил фрезерованный торф (90 %) и древесные опилки (10 %). В смеси состав бурого угля был уменьшен на 3 % и добавлены дробленые брикеты фракционным составом 0÷5 мм.

Зависимость насыпной плотности от размера фракций с вводом фрезерного торфа представлена в таблице и на рисунке 2.

Таблица – Зависимость насыпной плотности от размера фракций

№ п/п	Размер фракций ϕ , мм	Насыпная плотность $\Pi(\phi)$, кг/м ³	
		торф	опилки
1	40	545	570
2	30	555	580
3	20	575	590
4	10	670	695
5	2,5	1030	1030

$$\Pi(\phi) = \Pi_0 + \Pi_1 \cdot \phi + \Pi_2 \cdot \phi^2 + \Pi_3 \cdot \phi^3,$$

где $\Pi_0, \Pi_1, \Pi_2, \Pi_3$ – коэффициенты модели: $\Pi_0 = 1,196 \cdot 10^3$, $\Pi_1 = -76,109$, $\Pi_2 = 2,887$, $\Pi_3 = -0,035$ для торфа; $\Pi_0 = 1,189 \cdot 10^3$, $\Pi_1 = -71,808$, $\Pi_2 = 2,696$, $\Pi_3 = -0,032$ для опилок.

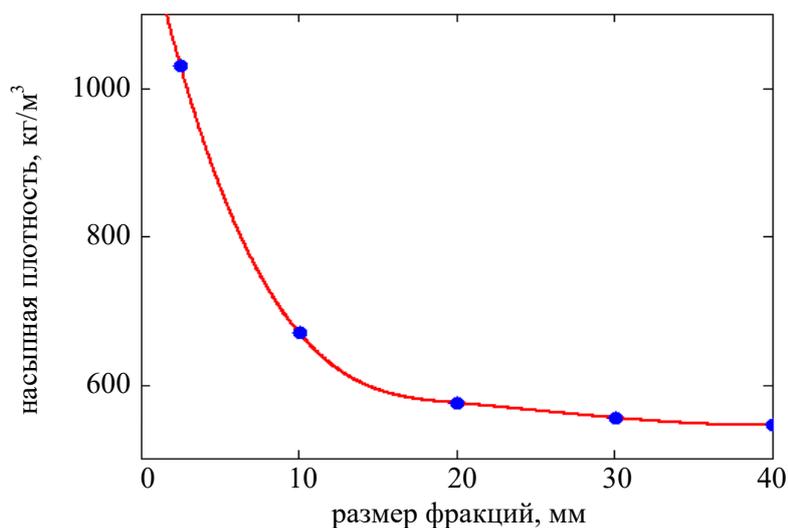


Рисунок 2 – Зависимость насыпной плотности от размера фракций (торф)

Зависимость насыпной плотности от размера фракций с вводом опилок представлена на рисунке 3.

Как видно из выше изложенного, замена бурого угля и опилок на фрезерный торф и дробленые брикеты торфа возможна. При этом необходимо продолжить изучение влияния использования торфа в технологии на состояние охраны окружающей среды, так как на участке массоподготовки при работе оборудования отмечалось некоторое пылеобразование.

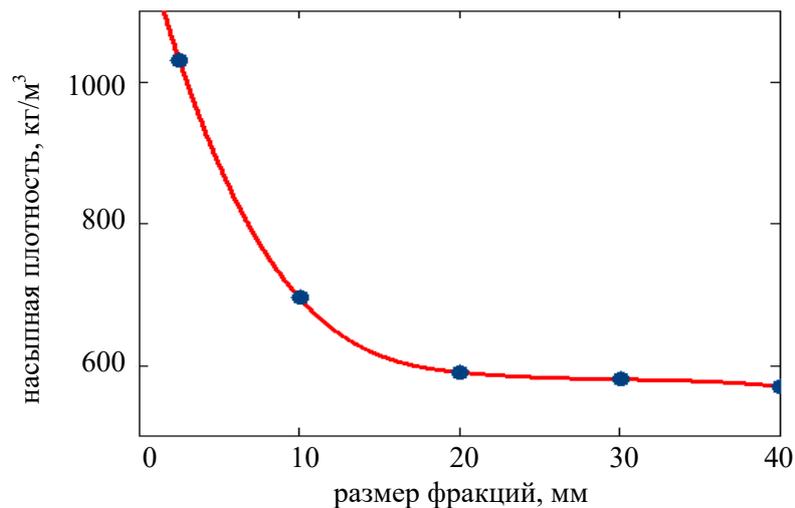


Рисунок 3 – Зависимость насыпной плотности от размера фракций (опилки)

При исследовании веществ неоднородной структуры, пористых тел, к которым относится торф, существенную роль играет коэффициент теплопроводности [4]. Существует ряд методов для определения коэффициента теплопроводности, которые исследуют зависимость коэффициента от температуры, влажности, структуры торфа по отдельности. Эквивалентный коэффициент теплопроводности λ_3 складывается из компонентов молекулярной λ , конвективной λ_k и лучистой λ_l теплопроводности:

$$\lambda_3 = \lambda + \lambda_k + \lambda_l.$$

В капиллярно-пористом теле при малых перепадах температуры передача тепла конвекцией и излучением в порах тела мала по сравнению с передачей молекулярной теплопроводностью.

Нами предложен комплексный метод определения теплофизических характеристик различных материалов, с помощью которого был исследован торф кусковой, измельченный, фрезерный и брикетированный. Известно, что изменение коэффициента теплопроводности в зависимости от температуры и влагосодержания описывается соотношением

$$\lambda = \lambda_0 + A t u e^{-bu},$$

где λ_0 – коэффициент теплопроводности абсолютно сухого тела при 0 °С, ккал/м·час·°С;

A и b – постоянные;

t – температура, °С;

u – влагосодержание торфа, %.

В расчетах использовались измерения при температурах 10 °С и 15 °С, соответственно со средним влагосодержанием 58 % и 69 %, $\lambda_0 = 0,06$ ккал/м·час·°С. Получены аналитические зависимости коэффициента теплопроводности для рассмотренных разновидностей торфа.

Так, для торфа брикетированного получилась аналитическая зависимость коэффициента теплопроводности от температуры и влагосодержания в виде

$$\lambda = \lambda_0 + 10,59tue^{-1,81u}.$$

Использование таких функциональных зависимостей для теплофизических коэффициентов торфа позволяет оптимизировать процессы сушки и брикетирования торфа.

Выводы

Была разработана комплексная малоотходная технология добычи и переработки нерудных строительных материалов, где вскрышная порода (суглинки) при добыче силикатного песка на карьере «Фаниполь» Минского района может использоваться в технологии получения некоторых пористых строительных материалов на основе аглопорита и керамического кирпича на ОАО «Минский завод строительных материалов» (рисунок 4).

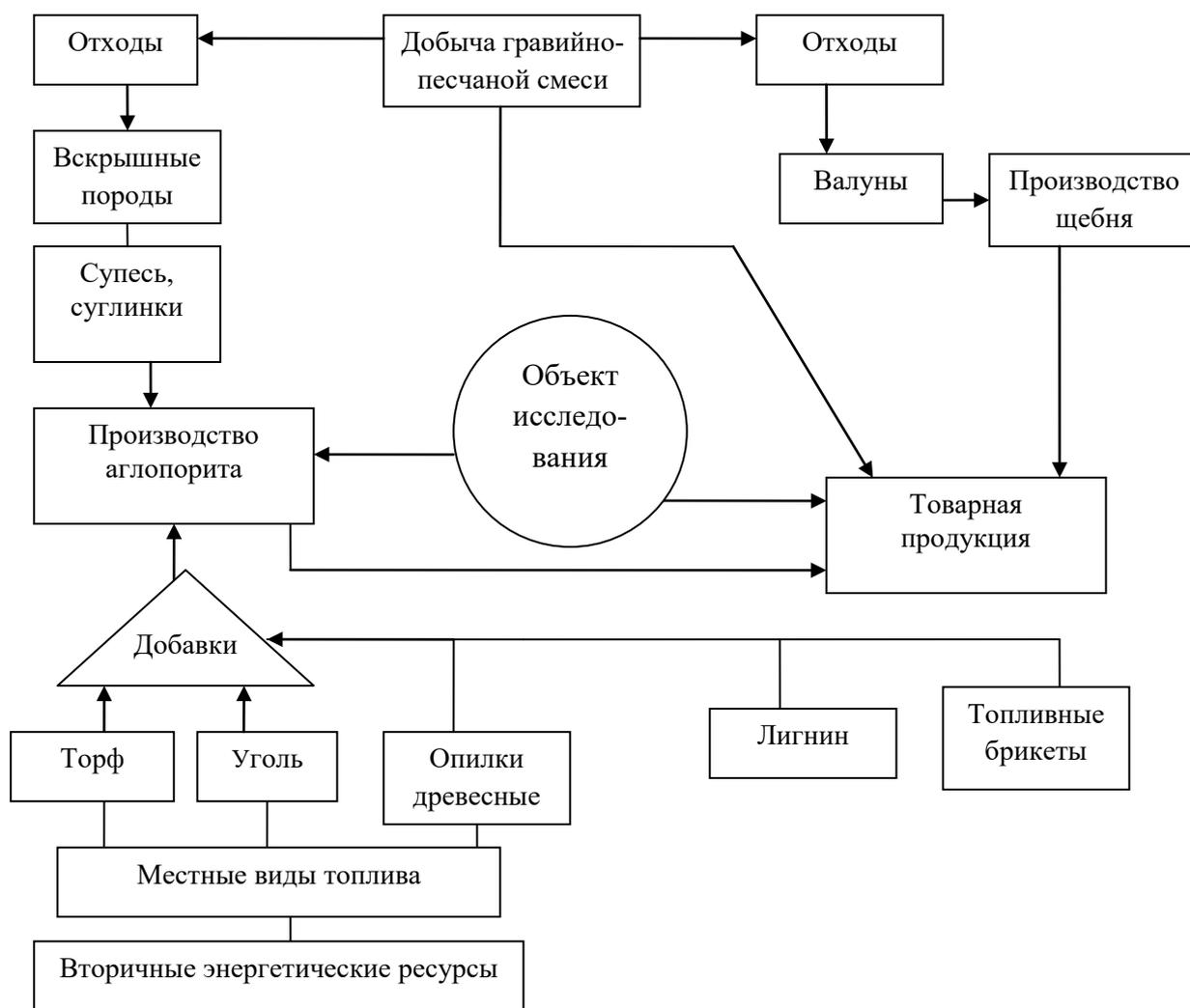


Рисунок 4 – Комплексная малоотходная ресурсосберегающая технология добычи и переработки нерудных строительных материалов с использованием местных видов топлива

Также в качестве импортозамещающих материалов нами предлагается использовать местные виды топлива на основе фрезерного торфа, топливных брикетов и древесные опилки. Это позволит не только уменьшить себестоимость аглопорита и керамического кирпича, но и получить значительный экономический эффект при выпуске единицы продукции.

Одним из важных направлений решения комплексной проблемы повышения эффективности и качества разработки месторождений ГПС должно стать широкое ресурсо- и энергосбережение. При этом на экономию одной тонны сырья при добыче, переработке и транспортировании ГПС затрачивается меньше средств. Эту программу можно осуществить путем реализации комплекса организационно-экономических, технологических и технических направлений, обеспечивающих наибольшую экономию ресурсов и их эффективное использование в горной промышленности.

Список используемых источников

1. **Березовский, Н.И.** Природные ресурсы и их использование / Н.И. Березовский, Е.К. Костюкевич. – Минск: БНТУ, 2005. – 188 с.
2. **Березовский, Н.И.** Обогащение и комплексное использование минеральных ресурсов: монография / Н.И. Березовский, С.Н. Березовский, Б.В. Лесун. – Минск: БИП, 2012. – 91 с.
3. **Березовский Н.И.** Разработка инновационных технологий: монография / Н.И. Березовский, С.Н. Березовский, Б.В. Лесун. – Минск: БИП, 2013. – 84 с.
4. **Воронова, Н.П.** Математическое моделирование и управление теплотехнологиями промышленных производств: монография / Н.П. Воронова. – Минск: БНТУ, 2009. – 259 с.

Lesun B.V.

Rational use of local mineral resources

The questions about the prospects for rational use of local mineral resources and the prospects for effective use of peat for energy purposes are considered. It is shown the scope of work which is carried out in the Republic of Belarus within the State program «Peat» and GPNI «The development of scientific bases of environment-friendly technology of porous building materials using local fuels and waste energy». The directions needed to implement a plan to increase the use of peat for energy purposes are stated.

Поступила в редакцию 18.07.2014 г.

УДК 622.362.023.2.03(476)(047)

ОЦЕНКА ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ГРАВИЙНО-ПЕСЧАНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ И ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ УСТУПОВ

Березовский С.Н. (ГУВПО «Белорусско-Российский университет», г. Могилев, Беларусь), Лесун Б.В. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь)

В статье проанализирована выборка из 40 месторождений Республики Беларусь для выявления распределения месторождений по градациям параметров основных признаков. В качестве показателя классификации принято среднее содержание гравия и валунов по месторождению. Исследования показали, что общая дисперсия содержания крупного каменного материала растет по месторождениям с увеличением среднего содержания гравия и валунов и наблюдается рост показателя геометрической изменчивости ω . Показана корреляция между общей дисперсией содержания по месторождениям и показателем геометрической изменчивости ω по месторождениям РБ. В статье также рассмотрено распределение случайных отклонений высоты добычного уступа от ее оптимального значения, что позволяет прогнозировать высоту уступа и связанные с ней параметры с заданной вероятностью.

Введение

Геолого-экономическая оценка минерально-сырьевых ресурсов гравийно-песчаных месторождений проводится, как правило, по отдельным объектам на основе составления технико-экономических обоснований кондиций для подсчета запасов полезного ископаемого. В настоящее время существенно изменились требования к минеральному сырью. При проведении комплексной геолого-экономической оценки ресурсов полезных ископаемых возникают трудности в проектных расчетах по причине недостаточных научных разработок в данном направлении.

Согласно инструкции по применению классификации запасов к месторождениям песка и гравия, гравийно-песчаные месторождения по размерам и качественным характеристикам полезной толщи подразделяются:

- на крупные и средние пластовые и пластообразные с изменчивым качеством песка и гравия;
- на небольшие линзообразные с невыдержанным строением и непостоянным качеством песка и гравия.

По классификации запасов твердых полезных ископаемых месторождения для составления проектов разработки по требуемому соотношению объема запасов различных категорий (А, В и С₁) подразделяются на три группы.

К первой группе относятся месторождения простого строения с выдержанной мощностью тел полезных ископаемых и равномерным распределением полезных компонентов. Месторождения этой группы характеризуются запасами категорий А, В и С₁.

Ко второй группе относятся месторождения сложного строения с невыдержанной мощностью тел полезных ископаемых или неравномерным распределением полезных компонентов. Для этой группы выявление запасов категории А считается нецеле-

сообразным, ей соответствуют второй и третий типы гравийно-песчаных месторождений.

К третьей группе относятся месторождения (участки) очень сложного строения с резко изменчивой мощностью тел полезных ископаемых или исключительно невыдержанным содержанием полезных компонентов. Для этой группы считается нецелесообразным выявление запасов категории А и В, и, в связи с этим, допускается проектирование предприятий на базе запасов категории С₁ и частично по категории С₂. Месторождения, относящиеся к этой группе, в настоящее время, как правило, практического значения не имеют. Однако в районах с дефицитом гравия и песка они могут использоваться в качестве сырьевой базы строительных материалов местного значения.

Основные показатели месторождений гравийно-песчаных пород характеризуются высокой изменчивостью. Содержание гравия и валунов является наиболее важным показателем, в значительной мере определяющим экономическую эффективность разработки месторождений.

Исследования основных признаков и параметров месторождений РБ

Для выявления распределения месторождений по градациям параметров основных признаков была проанализирована выборка из 40 месторождений Республики Беларусь. В качестве показателя классификации принято среднее содержание гравия и валунов по месторождению. Наибольшая значимость этого показателя обусловлена его влиянием на технико-экономическую эффективность предприятия; выбор вида и параметров технологической схемы переработки гравийно-песчаных пород и схемы цепи аппаратов; номенклатуру выпускаемой готовой продукции; выбор вида и параметров процессов управления формированием качества сырья.

Наибольшее распространение для оценки изменчивости показателей месторождений получило использование дисперсии или среднеквадратичного отклонения. Дисперсия принята как стандартный критерий оценки изменчивости содержания гравия и валунов в отчетах о геологоразведочных работах. Общую дисперсию по месторождению или его участку можно найти по формуле [1]:

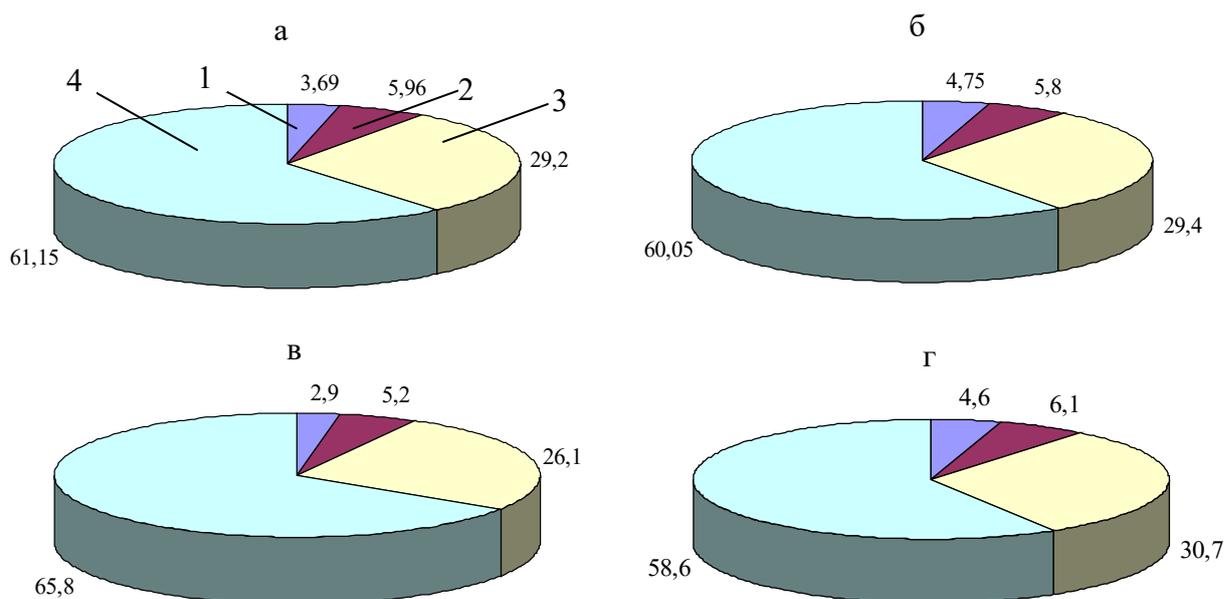
$$D_{\text{общ.п.}} = \frac{x_1^2 + \dots + x_N^2}{N} - \left(\frac{x_1 + \dots + x_N}{N} \right)^2, \quad (1)$$

где x_1, \dots, x_N – содержание гравия и валунов по скважинам, шурфам вдоль фронта добычных работ, %;

N – число разведочных выработок (число замеров).

Результаты оценки общей дисперсии зернового состава гравийно-песчаной смеси (ГПС) месторождения «Боруны», выполненной по данным геологоразведочных работ Гродненской поисково-разведочной партией Южно-Белорусской экспедиции, приведены на рисунке 1.

При расчетах параметров процессов добычи и переработки сырья ориентируются не на средние значения дисперсий, а на те их значения, которые охватывают основной массив значений дисперсий по месторождению или его участку. Для повышения надежности определения общей дисперсии в расчетах принимают величину, охватывающую 90 % всех значений дисперсий. Расположив значения дисперсий содержания, установленные для отдельных рядов разведочных выработок, в порядке их возрастания, отбрасывают 10 % верхних значений и из оставшихся принимают наибольшее [1].



а – блок 1; б – блок 2; в – блок 3; г – блок 4;
 1 – гравий и валуны размером > 70 мм; 2 – 70-40 мм; 3 – 40-5 мм;
 4 – гравий и валуны размером до 5 мм

Рисунок 1 – Зерновой состав месторождения ГПС «Боруны»

Для оценки изменчивости показателей по отдельным рядам замеров (главным образом, рядом разведочных выработок) используется параметр ω , который характеризует геометрическую изменчивость.

Сущность показателя заключается в том, что средний квадрат разности значений содержания крупного каменного материала более 5 мм (гравия и валунов) в точках, удаленных друг от друга на расстоянии h , оценивается по данным геологической разведки [1]:

$$\omega^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{i-1})^2}{L}, \quad (2)$$

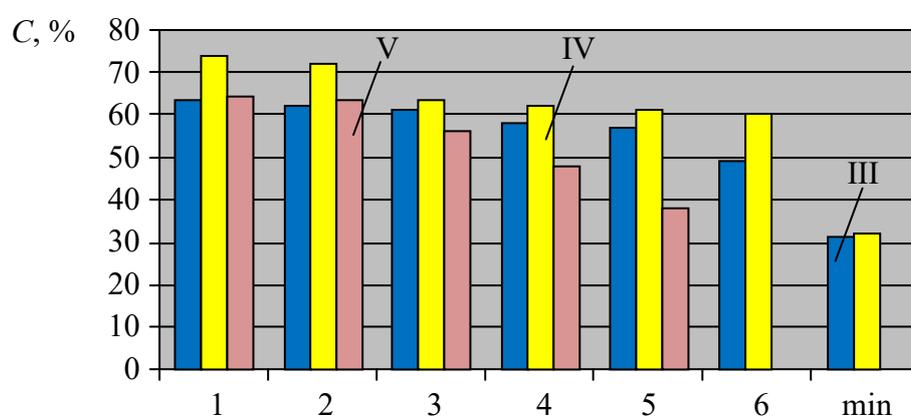
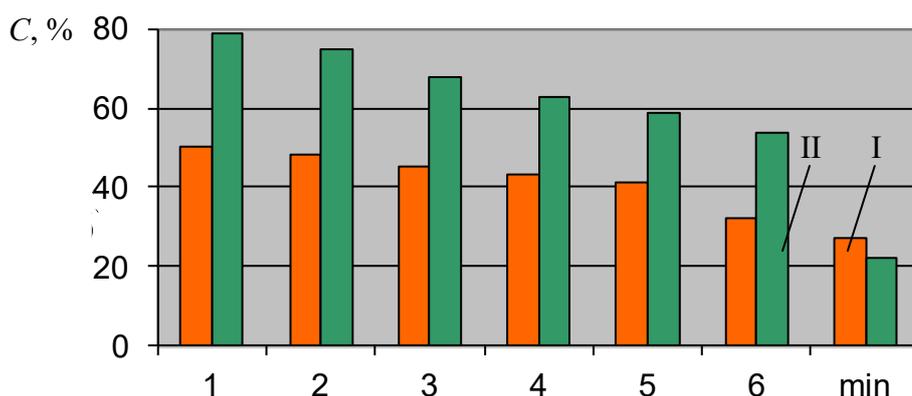
где n – число разведочных выработок по линии замера;

x_i – данные замеров содержания посредством использования разведочных выработок по линии замера (фронту работ);

L – протяженность линии замера (фронта работ).

Полученные нами результаты показали, что наибольшее количество каменного материала более 5 мм содержится на месторождении «Коммунистическое» Витебской области (до 79 %). Далее следует месторождение «Бомбалы» Минской области (до 74 %). Содержание каменного материала более 5 мм по всем областям Республики Беларусь представлено на рисунке 2.

Исследования показали, что общая дисперсия содержания крупного каменного материала по карьерам «Нерудпрома» составляет: Волма – 20-35 %, Ваньковщина – 25-40 %, Крапужино – 30-45 %, Векшичи – 25-30 %, Ленинское – 23-38 %.



I – Брестская область; II – Витебская область; III – Гродненская область;
 IV – Минская область; V – Могилевская область; 1-6 – месторождения ГПС по областям
Рисунок 2 – Содержание каменного материала (C) размером более 5 мм по месторождениям ГПС в РБ

Сопоставление характеристик изменчивости содержания крупного каменного материала (более 5 мм) по областям РБ показывает, что дисперсия содержания каменного материала растет по месторождениям с увеличением среднего содержания гравия и валунов. Также наблюдается рост геометрической изменчивости (рисунки 3, 4).

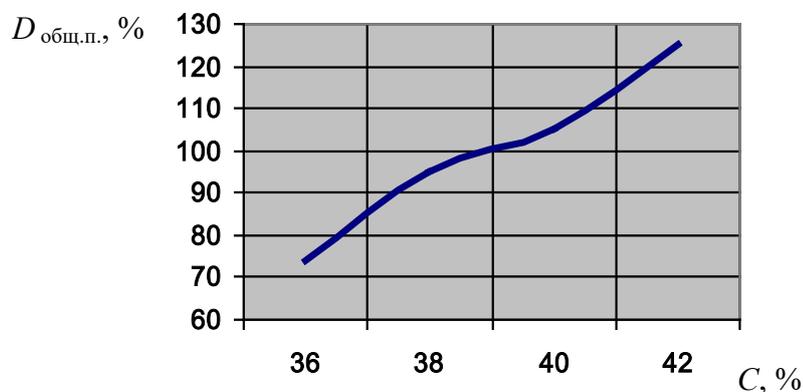


Рисунок 3 – Зависимость общей дисперсии содержания гравия и валунов ($D_{\text{общ.п.}}$) по месторождению от их среднего содержания в смеси (C)

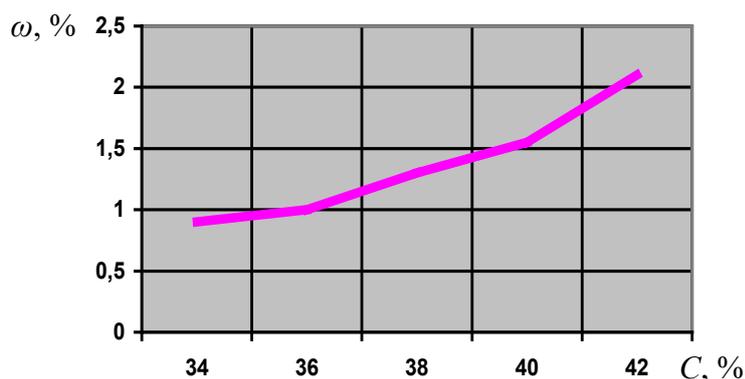


Рисунок 4 – Зависимость геометрической изменчивости (ω) от среднего содержания гравия и валунов в смеси

Обращает на себя внимание также наличие корреляции между общей дисперсией содержания по месторождениям и показателем геометрической изменчивости ω по месторождениям ГПС РБ.

При разработке гравийно-песчаных месторождений, имеющих сложное строение, значительным колебаниям подвержена высота уступов. Ее изменения оказывают значительное влияние на производительность выемочно-погрузочного оборудования, на интенсивность развития горных работ и на достижимую производительность карьера по горно-геологическим условиям. Применительно к производительности экскаваторов большое значение имеет изучение теоретических распределений так называемой «относительной высоты уступа», представляющей собой отношение фактической высоты уступа к ее оптимальной величине. Изучение распределения случайных отклонений высоты уступа от ее оптимального значения позволяет прогнозировать высоту уступа и связанные с ней параметры с заданной вероятностью. На рисунке 5 приведены эмпирические распределения названного коэффициента для месторождений ГПС РБ. Большой объем информации предопределил группирование данных и их представление в виде гистограмм.

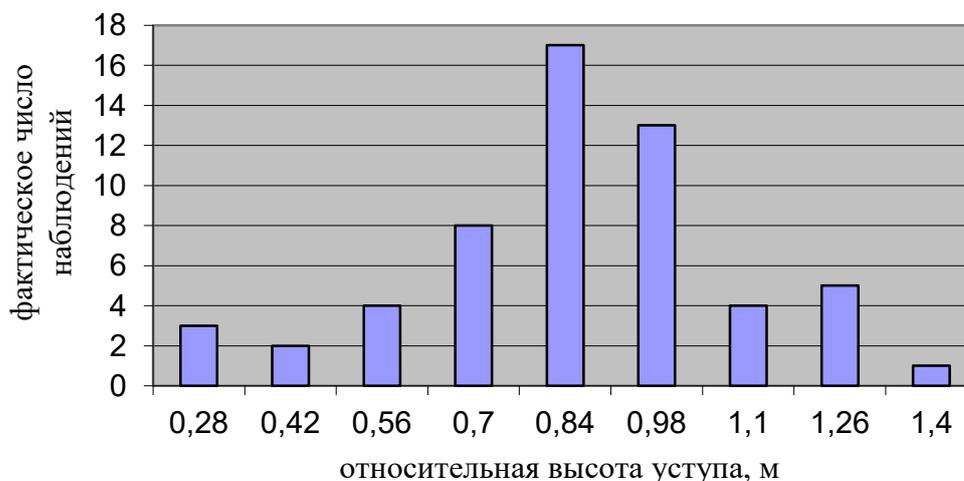


Рисунок 5 – Гистограмма распределения относительной высоты уступа для гравийно-песчаных месторождений РБ

Случайная изменчивость относительной высоты уступа может быть оценена, если установлено соответствие эмпирических распределений теоретическим. На этом основываются главные элементы прогнозирования случайных величин вероятностными методами. Задача состояла в том, чтобы с помощью выборки сделать вывод, какое именно распределение имеет совокупность, из которой взята выборка, т.е. установить связь между возможными значениями относительной высоты уступа и соответствующими им вероятностями. Изучение распределения этого коэффициента позволяет с заданной точностью осуществлять прогноз производительности оборудования и карьера в целом, что особенно важно при производстве горных работ на месторождениях гравийно-песчаной смеси.

В наиболее общем виде плотность распределения случайной величины x с помощью интегральной функции распределения выражается формулой:

$$f(x) = \frac{d}{dx} |F(x)|. \quad (3)$$

Вероятность того, что случайная величина примет значение, не превышающее x_1 , можно найти с помощью плотности распределения следующим образом [2, 3]:

$$p(x \leq x_1) = F(x_1) = \int_{-\infty}^{x_1} f(y) dy. \quad (4)$$

Аналогично определяются вероятности $p(x > x_2)$ и $p(x_1 < x < x_2)$.

При выборе плотности распределения коэффициента относительной высоты уступа мы должны ограничиваться теми функциями, которые принимают неотрицательные значения, а их интеграл равен единице на заданном пространстве изменения аргумента. Этим требованиям удовлетворяет целый ряд распределений, из которых наиболее общими моделями являются гамма-распределение, распределение Вейбулла, логарифмически-нормальное распределение и другие.

Пусть \bar{h} – коэффициент относительной высоты уступа, для которого требуется подобрать теоретическое распределение. Подбор теоретического распределения начинается с определения накопленной теоретической вероятности для каждого интервала относительной высоты уступа. Определив интервальные теоретические вероятности для каждого класса распределения, и сравнивая их с эмпирическими частотами по величине критерия χ^2 -Пирсона для заданного уровня значимости, судят о соответствии выбранного распределения экспериментальным данным. Критерий χ^2 определяется по формуле [4, 5]:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(n_i - NP_i)^2}{NP_i}, \quad (5)$$

где m – количество классов;

n_i – интервальная эмпирическая частота;

N – число наблюдений;

P_i – интервальная теоретическая вероятность.

Вычисленное значение критерия сравнивается с граничным для заданного уровня значимости и числа степеней свободы. Число степеней свободы:

$$k = m - p - 1, \quad (6)$$

где p – число неизвестных параметров распределения.

Граничное значение критерия χ^2 устанавливается по специальной таблице [5].

Аппроксимация экспериментальных данных относительной высоты уступа различными типами распределений показала, что наилучшей моделью является распределение Вейбулла, функция плотности вероятности которой имеет вид:

$$f(h'; \eta, \sigma) = \frac{\eta}{\sigma} \left(\frac{h'}{\sigma}\right)^{\eta-1} \exp\left[-\left(\frac{h'}{\sigma}\right)^\eta\right], \quad h' \geq 0, \sigma > 0, \eta > 0, \quad (7)$$

где h' – относительная высота уступа;

σ – параметр масштаба;

η – параметр формы.

Параметры масштаба σ и формы η вычислены по опытным данным с использованием формул [3]:

$$\left(\frac{s}{\bar{x}}\right)^2 + 1 = \frac{\tilde{A} \left(1 + \frac{2}{\eta}\right)}{\tilde{A}^2 \left(1 + \frac{1}{\eta}\right)}, \quad (8)$$

$$\sigma = \frac{\bar{x}}{\tilde{A} \left(1 + \frac{1}{\eta}\right)}, \quad (9)$$

где s – среднеквадратическое отклонение;

\bar{x} – среднее значение случайной величины;

\tilde{A} – гамма-функция.

Для параметров распределения относительной высоты уступа получены следующие оценки $\sigma = 0,95$ и $\eta = 3,92$.

Сравнение фактического числа наблюдений с ожидаемым для различных интервалов относительной высоты уступа на основе распределения Вейбулла, приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение фактических данных наблюдений с теоретическими при выборе распределения Вейбулла

Классы	Центр	Фактическое число наблюдений	Предсказанное число наблюдений
0,21-0,35	0,28	3	1
0,35-0,49	0,42	2	3
0,49-0,63	0,56	4	6
0,63-0,77	0,7	8	10
0,77-0,91	0,84	17	12
0,91-1,05	0,98	13	11
1,05-1,19	1,1	4	8
1,19-1,33	1,26	5	4
1,33-1,47	1,4	1	1

Критерий χ^2 для 5 % уровня значимости равен 8,92, что меньше его допустимого табличного значения ($\chi^2 = 12,6$ при 6-ти степенях свободы). Следовательно, полученные данные не противоречат распределению Вейбулла, что также наглядно видно из приведенной таблицы.

При определении технической производительности карьера, в принципе, возможно использование и других теоретических распределений. Поэтому представляет интерес их сравнительный анализ. Аппроксимация полученного распределения коэффициента относительной высоты уступа другими типами распределений в широком диапазоне горнотехнических условий дает худшие результаты. Например, для гамма-распределения критерий χ^2 равен 37,7 и 26,5 для логарифмически-нормального распределения, что превышает его допустимое табличное значение.

Таким образом, для широкого диапазона горнотехнических условий на открытых разработках гравийно-песчаных месторождений наиболее приемлемой моделью для описания распределения относительной высоты уступа является распределение Вейбулла. Теперь можно прогнозировать высоту уступа и связанные с ней параметры с заданной вероятностью.

Прогнозирование производительности экскаватора необходимо на стадии проектирования горного предприятия и на этапе его эксплуатации. Определять ожидаемую производительность экскаваторов необходимо в следующих случаях:

- при составлении ТЭО кондиций для разработки полезных ископаемых;
- при составлении технического проекта на разработку месторождения;
- для разработки плана развития горных работ на текущий год;
- при изменении технологической схемы производства горных работ.

Особенно важно точно определять технически достижимую производительность экскаватора при изменчивых параметрах залежи, что характерно для гравийно-песчаных месторождений. Для таких сложных условий нужны совершенные методы определения достижимой технической производительности экскаваторов, обеспечивающие высокую надежность прогноза.

На практике большое распространение для определения технической производительности экскаваторов получили формулы простейшего вида:

$$Q_{см} = 3600 k_n k_h E / (t_{ц} k_p), \quad (10)$$

где $t_{ц}$ – продолжительность цикла, с;

k_n и k_p – коэффициенты соответственно наполнения ковша и разрыхления породы в ковше;

k_h – коэффициент относительной высоты уступа;

E – емкость ковша экскаватора, м³.

Значения коэффициента относительной высоты уступа рекомендуется принимать в зависимости от соотношения фактической высоты уступа и ее рационального значения (таблица 2).

Таблица 2 – Значения коэффициента относительной высоты уступа

Отношение фактической высоты забоя к рациональной высоте забоя	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
Коэффициента относительной высоты уступа k_h	0,8	0,91	0,97	1,00	0,97	0,85

В формуле (10) емкость ковша – величина детерминированная и определяется конкретной моделью экскаватора. Значения коэффициентов наполнения и разрыхления ковша в пределах одной категории обрабатываемых пород также являются величинами стабильными. Значительным вариациям подвержен коэффициент относительной высоты уступа, так как фактические значения высоты уступов в процессе работ непостоянны. Так, например, для рудных карьеров при номинальном значении 15 м фактическая высота уступа меняется от 14 до 17 м, что указывает на необходимость учета ее вариаций. Большие колебания имеет высота уступа гравийно-песчаных месторождений. Высота вскрышных уступов колеблется в пределах от 0,2 до 6 м, в отдельных случаях до 10 метров. Более сложная ситуация на добычных уступах, для которых вариации высоты отличаются более чем в 2 раза. Поэтому, при использовании формулы (10) и ее аналогов для определения производительности экскаватора большое значение имеет достоверное определение коэффициента относительной высоты уступа.

При известной зависимости производительности карьера от коэффициента относительной высоты уступа задача сводится к оценке его наиболее вероятного значения. Первоначально определим вид зависимости $k_h = f(\bar{h})$. Для ее установления воспользуемся эмпирическими данными (таблица 1). Для подбора коэффициентов уравнения воспользуемся методом наименьших квадратов. Подбор уравнения регрессии выполнен на ПЭВМ по специальной программе. На рисунке 6 приведено полученное уравнение регрессии.

Зависимость хорошо описывается уравнением (индекс корреляции равен 0,98):

$$k_h = (0,84(\bar{h})^2 - 1,6\bar{h} + 1,76)^{-1}. \quad (11)$$

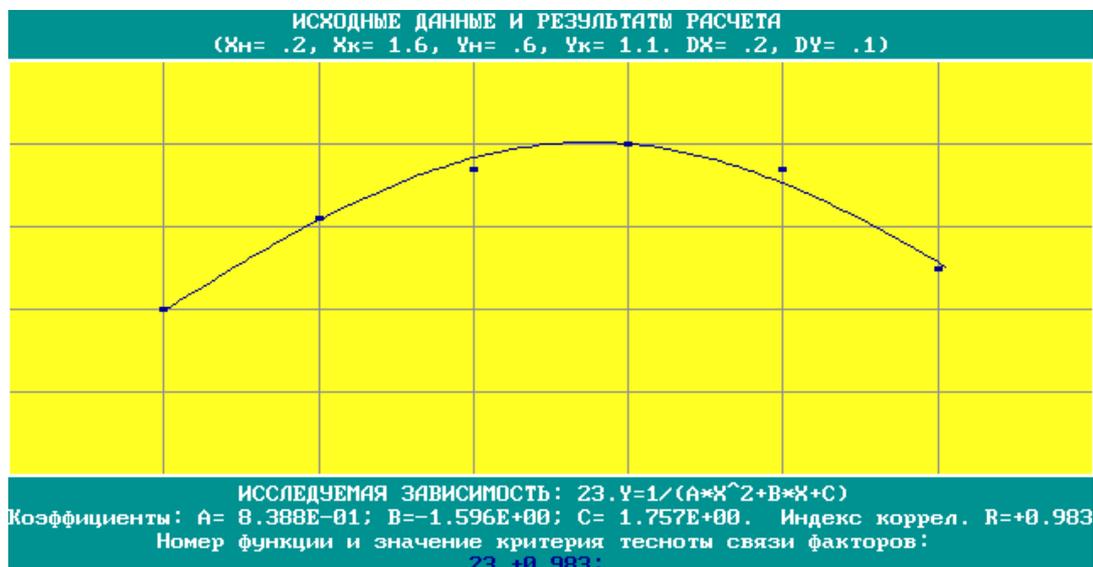


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента высоты уступа от относительной высоты уступа

Плотность вероятности относительной высоты уступа \bar{h} с достаточной степенью приближения может быть представлена формулой (4). Подставляя в формулу (7) функцию плотности вероятности относительной высоты уступа, имеем:

$$F(\bar{h}; \eta, \sigma) = \int_0^{\bar{h}} \frac{\eta}{\sigma} \left(\frac{y}{\sigma}\right)^{\eta-1} \exp\left[-\left(\frac{y}{\sigma}\right)^\eta\right] dy = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\bar{h}}{\sigma}\right)^\eta\right], \quad \bar{h} \geq 0. \quad (12)$$

Определим верхнее значение \bar{h} , обеспечивающее попадание случайного значения \bar{h} в интервал $[0, \bar{h}]$ с вероятностью $P(\bar{h})$:

$$P(\bar{h}) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\bar{h}}{\sigma}\right)^\eta\right], \quad (13)$$

следовательно,

$$1 - P(\bar{h}) = \exp\left[-\left(\frac{\bar{h}}{\sigma}\right)^\eta\right].$$

Логарифмируя левую и правую части уравнения, имеем:

$$\begin{aligned} -\ln(1 - P(\bar{h})) &= \left(\frac{\bar{h}}{\sigma}\right)^\eta \\ -\ln(1 - P(\bar{h})) \cdot \sigma^\eta &= \bar{h}^\eta, \end{aligned}$$

откуда

$$\bar{h} = \sigma \sqrt[\eta]{-\ln(1 - P(\bar{h}))}. \quad (14)$$

Формула (14) позволяет просто и надежно определять прогнозную относительную высоту уступа и соответствующую ей производительность экскаватора по результатам контрольных измерений фактической высоты уступа или по результатам имитационного моделирования. Предлагается следующий порядок выполнения расчетов.

1. По результатам моделирования или измерений на ЭВМ вычисляются параметры формы η и масштаба σ коэффициентов относительной высоты уступа.

2. Задается вероятность, с которой фактическое значение относительной высоты уступа не превысит ожидаемое.

3. Определяется предельное значение относительной высоты уступа. Вычисления выполняются по формуле.

4. Рассчитывается ожидаемое значение коэффициента относительной высоты уступа по формуле и с заданной вероятностью техническая производительность экскаватора по формуле (10).

Выводы

Проанализирована выборка из 40 месторождений гравийно-песчаной смеси Республики Беларусь для выявления распределения месторождений по градациям параметров основных признаков. В качестве показателя классификации принято среднее содержание гравия и валунов по месторождению, от которого зависят многие параметры карьера. Исследования показали, что общая дисперсия содержания крупного материала растет по месторождениям с увеличением среднего содержания гравия

и валунов, и наблюдается рост показателя геометрической изменчивости ω . На рисунках показана корреляция между общей дисперсией содержания по месторождениям и показателем геометрической изменчивости ω по месторождениям РБ. Рассмотрено распределение случайных отклонений высоты добычного уступа от ее оптимального значения, что позволяет прогнозировать высоту уступа и связанные с ней параметры с заданной вероятностью. Сравнительный анализ распределений показал, что для широкого диапазона горнотехнических условий на открытых разработках гравийно-песчаных месторождений наиболее приемлемой моделью для описания распределения относительной высоты уступа является распределение Вейбулла. Аппроксимация полученного распределения коэффициента относительной высоты уступа другими типами распределений в широком диапазоне горнотехнических условий дает худшие результаты. Например, для гамма-распределения критерий χ^2 равен 37,7 и 26,5 для логарифмически-нормального распределения, что превышает его допустимое табличное значение.

Список использованных источников

1. Буянов, Ю.Д. Разработка гравийно-песчаных месторождений / Ю.Д. Буянов. – М.: Недра, 1988. – 209 с.
2. Беляков, Ю.И. Выемочно-погрузочные работы на карьерах / Ю.И. Беляков. – М.: Недра, 1987. – 268 с.
3. Амосов, А.А. Вычислительные методы для инженеров / А.А. Амосов, Ю.А. Дубинский. – М.: Высш. школа, 1994. – 544 с.
4. Хан, Г. Статистические модели в инженерных задачах / Г. Хан, С. Шапиро. – М.: Мир, 1969. – 231 с.
5. Хартман, К. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шеффер. – М.: Мир, 1977. – 552 с.

Berezovsky S.N., Lesun B.V.

Granulometric composition evaluation of the gravel-sand deposits of the Republic of Belarus and study of theoretical distribution of the benches height

The article gives the analysis of 40 deposits of the Republic of Belarus for a detection of distribution of the deposits according to the parameter gradation of the basic features. The average content of gravel and boulders in the deposits is accepted as an indicator. It was stated, that total dispersion of the content of a large stone material is increasing along the deposits and there is the growth of an index of geometric variability ω . The correlation is shown between total dispersion of the content in the deposits and the index of geometric variability ω in the deposits of the Republic of Belarus. The paper also considers the distribution of random deviations of the mining bench height from its optimal value that allows forecasting the height of the bench and the parameters relevant to it with specified probability.

Поступила в редакцию 28.07.2014 г.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.891:629.4.077–592.59

РАЗРУШЕНИЕ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Богданович П.Н., Чернопяткин А.Е. (УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь)

Рассматриваются особенности трения и изнашивания сопряжения «бронза – сталь» при непрерывном и периодическом трении в условиях принудительного поддержания постоянной температуры смазочного материала. Показано, что переход от непрерывного скольжения к периодическому сопровождается ростом коэффициента трения и интенсивности изнашивания металлов. Этот эффект усиливается с уменьшением контактного давления, увеличением скорости скольжения и числа циклов «пуск – стоп».

Введение

Практически все смазываемые трибосопряжения горного оборудования эксплуатируются в режиме «пуск – стоп». Переход от статического к динамическому контакту сопровождается явлением предварительного смещения, возникновением вибраций и высокой интенсивностью изнашивания деталей, что существенно снижает долговечность узла деталей [1-3]. Это подтверждается исследованиями баббитовых и эластичных металлопластмассовых подшипников скольжения, работающих в условиях частых пусков и остановок [4], подшипников с реверсивным движением вала [5], металлополимерных сопряжений [1]. В работе [6] показано, что периодически прерывистый режим трения является основной причиной разрушения трущихся деталей.

Известно, что для сопряжений транспортных средств, работающих при гидродинамической смазке, один пуск (переход от статического к динамическому жидкостному трению) по интенсивности изнашивания соответствует десяткам километров пробега. Опубликованные в этой области данные касаются в основном циклически нагружаемых узлов трения, работающих в режиме гидродинамической смазки, где эффект практически очевиден и обусловлен переходом от граничного к жидкостному трению. Однако в реальных узлах машин и механизмов чисто гидродинамического режима трения достичь трудно, поэтому большинство трибосопряжений даже при непрерывном скольжении сопрягаемых деталей работает в условиях граничного либо полужидкостного трения. Поэтому представляет интерес изучить особенности трения и изнашивания деталей, работающих в режиме «пуск – стоп» при обедненной смазке.

Объекты и методы исследований

Испытания проводились на машине трения СМТ-1 по схеме контакта «ролик – вкладыш». Ролик 1 частично погружался в ванну 2 со смазочным материалом 3 и приводился в контакт с частичным вкладышем 4 (рисунок 1). С целью обеспечения одинаковой температуры при всех выбранных режимах испытаний с помощью насоса 5 осу-

ществлялась циркуляция смазочного материала через радиатор 6 и фильтр 7. Ролик был изготовлен из стали 45, а вкладыш – из бронзы БрОФ10-1. В качестве смазочного материала использовалось индустриальное масло И-8А селективной очистки. Выбор типа смазочного материала осуществляли исходя из того, что он должен содержать по возможности меньшее количество присадок, которые в процессе трения могут разлагаться и оказывать влияние на результаты измерений.

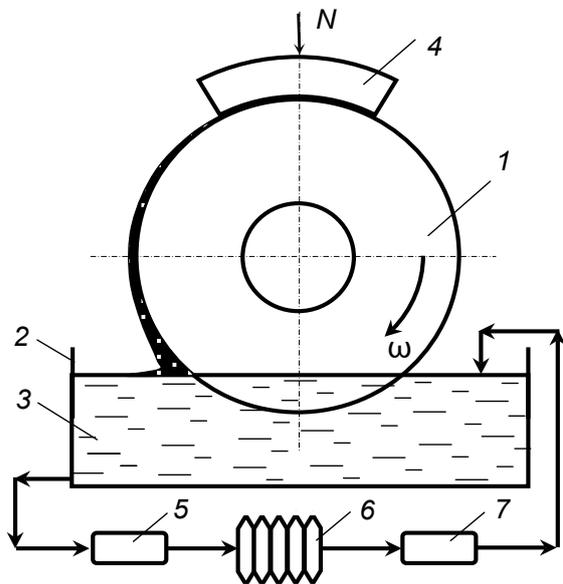


Рисунок 1 – Схема контакта образцов на машине трения СМТ-1

Скорость скольжения изменялась в интервале 0,3-1,3 м/с, а контактное давление – в интервале от 0,25 до 0,75 МПа. Продолжительность динамического контакта t_d составляла 15 или 5 минут, а статического t_s – 2 или 5 минут. Во всех испытаниях общее время динамического контакта составляло 120 минут. Проводилось четыре серии испытаний: при непрерывном скольжении; $t_d/t_s = 15/5$; $t_d/t_s = 15/2$; $t_d/t_s = 5/2$.

Линейная интенсивность изнашивания определялась взвешиванием по потере массы образца, а толщина смазочного слоя контролировалась с помощью устройства, принцип действия которого основан на использовании четырехпроводной электрической схемы [1].

Результаты исследований

Исследования показали, что в момент пуска коэффициент трения f бронзы по стали в 1,5-2 раза превышал последующие его значения при установившейся скорости скольжения. Причина в том, что в период, предшествующий движению, пленка смазочного материала между наиболее высокими выступами поверхностей сопрягаемых тел продавливается и это обеспечивает граничный режим трения. В процессе скольжения происходит «всплытие» вала, пленка частично восстанавливается и f снижается.

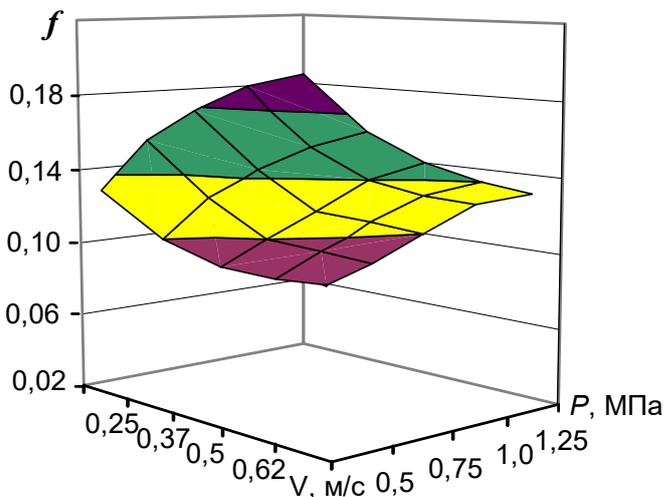


Рисунок 2 – Влияние режимов нагружения на коэффициент трения бронзы по стали

Величина коэффициента трения (0,06-0,19) свидетельствует о том, что в зависимости от скорости скольжения v и контактного давления P при непрерывном вращении вала реализуется трение от граничного до полужидкостного (рисунок 2). Повышение контактного давления

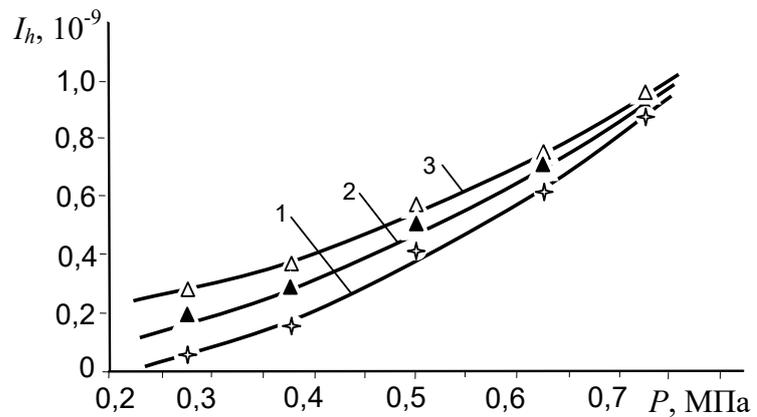
сопровождается сближением трущихся тел и уменьшением толщины смазочного слоя. При этом увеличивается глубина внедрения выступов поверхностей стального ролика в материал вкладыша, возрастают размеры пятен непосредственного контакта выступов сопрягаемых тел, и происходит образование дополнительного числа фрикционных связей. Увеличиваются контактные деформации изнашиваемого материала, и растет тепловыделение в зоне трения. Последнее подтверждается необходимостью повышения скорости циркуляции смазочного материала через систему охлаждения для поддержания постоянной температуры. Рост температуры на пятнах контакта способствует образованию более прочных фрикционных связей.

Зависимость $f(P)$ в виде выпуклых кверху кривых сохраняется во всем диапазоне изменения скоростей. С увеличением скорости скольжения и, как следствие, объема смазывающей жидкости, подаваемой вращающимся валом в конфузторную часть зазора, толщина смазочного слоя растет. Это сопровождается снижением f и переходом от граничного к полужидкостному трению. Описанное влияние скорости скольжения и контактного давления при непрерывном вращении вала существенно не отличается от такового при работе вала в режиме «пуск – стоп». Отличие состоит лишь в том, что для режима «пуск – стоп» характерны несколько более высокие средние значения коэффициента трения, чем для непрерывного скольжения.

Интенсивность изнашивания I_h бронзового вкладыша почти на порядок превышает I_h ролика. Независимо от скорости скольжения повышение контактного давления приводит к росту интенсивности изнашивания вкладыша (рисунок 3).

В данном случае основными видами являются абразивное изнашивание закрепленными частицами (роль абразивных частиц выполняют выступы поверхности стального ролика) и усталостное изнашивание (рисунок 4). О наличии усталостного изнашивания свидетельствуют микротрещины, расположенные почти перпендикулярно направлению скольжения (в направлении стрелки 1 на рисунке 4а). Бороздки, вытянутые в направлении скольжения представляют собой результат абразивного изнашивания (показаны стрелкой 2).

Повышение контактного давления сопровождается ростом циклически повторяющихся деформаций изнашиваемого материала и глубины внедрения выступов поверхности ролика в изнашиваемый материал и, как следствие, ростом интенсивности усталостного и абразивного изнашивания частичного вкладыша. Существенный вклад в изнашивание вкладыша вносит разрушение адгезионных связей (мостиков сварки между выступами поверхностей сопрягаемых деталей). О реализации адгезионного изнашивания свидетельствуют следы переноса бронзы на поверхность стального контртела (на рисунке 4б показаны стрелками). Сопутствующим является окислительное изнашивание.



1 – динамический контакт; 2 – $t_d = 15$ мин, $t_s = 2$ мин;
3 – $t_d = 5$ мин, $t_s = 2$ мин

Рисунок 3 – Зависимости интенсивности изнашивания вкладыша от нагрузки при $v = 0,3$ м/с

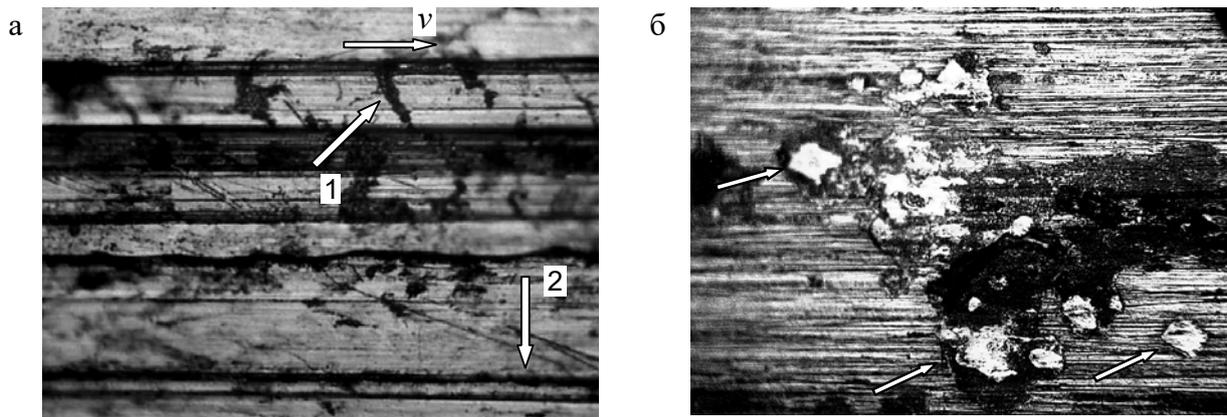
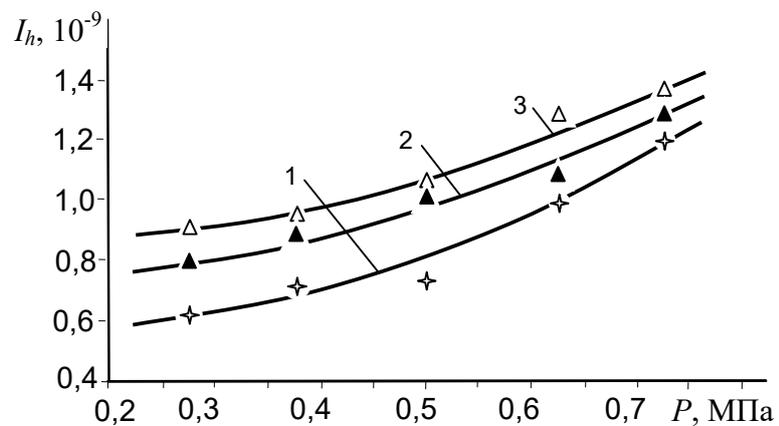


Рисунок 4 – Поверхность трения вкладыша (а) и ролика (б), $\times 160$

Сравнение кривых на рисунке 3 показывает, что зависимости $I_h(P)$ при низкой скорости непрерывного скольжения и трения в режиме «пуск – стоп» подчиняются одному закону. Переход от непрерывного скольжения к режиму 15 мин – динамический контакт и 5 мин – статический контакт (15/5) и режиму 15/2 приводит к повышению интенсивности изнашивания вкладыша. Сравнение I_h при режимах 15/5 и 15/2 указывает на то, что длительность периода отдыха (5 мин и 2 мин) мало влияет на процессы изнашивания. Более существенное повышение I_h наблюдается при переходе к режиму 5/2, при котором число пусков и остановок резко возрастает. Сближение кривых по мере увеличения P свидетельствует о том, что в области высоких нагрузок режим скольжения не оказывает существенного влияния на изнашивание сопрягаемых тел, т.к. во всех случаях реализуется граничное трение.

Более заметно влияние режима скольжения на I_h сказывается при достижении скорости скольжения 1 м/с (рисунок 5). Несмотря на то, что при увеличении v коэффициент трения снижается, интенсивность изнашивания вкладыша повышается. По-видимому, это связано с ростом температурных всплесков на пятнах контакта и снижением по этой причине прочности бронзы на локальных участках. Это способствует увеличению доли глубинного вырывания бронзы и переносу ее на поверхность ролика. О реализации адгезионного изнашивания свидетельствуют углубления на поверхности трения вкладыша и следы переноса бронзы на поверхность стального ролика.

При $v = 1$ м/с изменение интенсивности изнашивания вкладыша в зависимости от режима скольжения превышает 40 % (рисунок 5). В данном случае реализуется полужидкостное трение, и меньшее чем при $v = 0,3$ м/с число выступов вступает в непо-



1 – динамический контакт; 2 – $t_d = 15$ мин, $t_s = 2$ мин;
3 – $t_d = 5$ мин, $t_s = 2$ мин

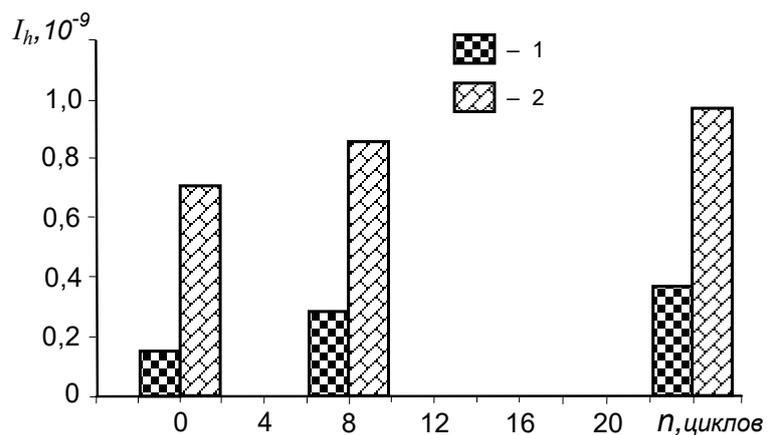
Рисунок 5 – Зависимости интенсивности изнашивания вкладыша от нагрузки при $v = 1,0$ м/с

средственный контакт. Поэтому в момент остановки вала относительное число вступающих в контакт выступов возрастает. По мере увеличения нормальной нагрузки влияние режимов скольжения ослабевает. Так, при $P = 0,25$ МПа приращение I_h при переходе от непрерывного скольжения к периодическому ($t_d/t_s = 5/2$) составляет $\sim 45\%$, а при $P = 0,62$ МПа – менее 25%. Уменьшение влияния режима скольжения на I_h (кривые сходятся) с ростом контактного давления обусловлено конкуренцией двух факторов. Суть первого из них в следующем: с увеличением P число пятен, на которых происходит адгезионное разрушение, и число выступов, вызывающих абразивное и усталостное изнашивание, становится настолько большим, что «эффект всплывания» вала при переходе к непрерывному скольжению становится малозаметным. В этом случае скорость вращения вала оказывается недостаточной для значительного увеличения толщины смазочного слоя даже при непрерывном скольжении. Это вызывает схождение кривых $I_h(P)$.

Второй фактор оказывает несколько меньшее влияние обратного действия: с повышением нагрузки температура вспышки на пятнах контакта становится выше. Из-за отсутствия периодов остановки и охлаждения в режиме непрерывного скольжения увеличение температуры вспышки на пятнах фактического контакта более существенно, чем в режиме «пуск – стоп», что увеличивает разницу между значениями интенсивности изнашивания при различных режимах скольжения. Отметим, что в экспериментах проводилось принудительное охлаждение смазочного материала, поэтому его средняя температура оставалась постоянной.

Для оценки влияния режима скольжения на изнашивание сопрягаемых деталей представляет интерес анализ зависимости I_h от числа циклов «пуск – стоп». На рисунке 6 видно, что переход от непрерывного скольжения к периодическому, и увеличение числа циклов n сопровождается монотонным ростом интенсивности изнашивания. Причем, характер зависимости $I_h(n)$ определяется скоростью скольжения. При скорости $v = 1,0$ м/с I_h выше, а зависимость $I_h(n)$ более существенна, чем при $v = 0,3$ м/с.

Увеличение числа циклов «пуск – стоп» за фиксированный период испытаний (суммарное $t_d = 120$ мин) сопровождается ростом интервала времени, в течение которого вкладыш подвергается повышенному адгезионному, усталостному и абразивному изнашиванию, вызванному наибольшим сближением сопрягаемых тел. Чем выше скорость скольжения, тем больше разница между сближением сопрягаемых тел при непрерывном и периодическом скольжении, и, как следствие, большее различие интенсивности изнашивания.



1 – $v = 0,3$ м/с; 2 – $v = 1,0$ м/с

Рисунок 6 – Зависимости интенсивности изнашивания вкладыша от числа циклов «пуск – стоп» при $P = 0,375$ МПа

Заключение

При переходе от непрерывного скольжения к периодическому в условиях принудительного поддержания постоянной температуры смазочного материала среднее значение коэффициента трения и интенсивность изнашивания металлов повышаются. Этот эффект усиливается с уменьшением контактного давления, увеличением скорости скольжения и числа циклов «пуск – стоп».

Список использованных источников

1. **Богданович, П.Н.** Закономерности изнашивания смазываемых деталей транспортных средств при эксплуатации в режиме «пуск – стоп» / П.Н. Богданович, С.В. Лашенко // Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса: материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 2013 г. / БелГУТ. – Гомель, 2013. – С. 5-7.
2. **Богданович, П.Н.** Закономерности разрушения материалов при динамическом контактном нагружении / П.Н. Богданович // Трение и износ. – 2013. – Т. 34, № 5. – С. 458-469.
3. **Богданович, П.Н.** Трение, смазка и износ в машинах / П.Н. Богданович, В.Я. Прушак, С.П. Богданович. – Минск: Технология. – 2011. – 527 с.
4. **Байбородов, Ю.И.** Определение износа эластичных металлопластмассовых и баббитовых подшипников скольжения в условиях частых пусков и остановок под нагрузкой / Ю.И. Байбородов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2007. – Т. 9, № 3. – С. 712-715.
5. **Сорокатый, Р.В.** Исследование формообразования изнашиваемых поверхностей / Р.В. Сорокатый, О.П. Бабак, А.А. Пасечник // Проблемы трибологии. – 2009. – № 4. – С. 14-29.
6. **Хоменко, А.В.** Периодический прерывистый режим граничного трения / А.В. Хоменко, Я.А. Ляшенко // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80, вып. 1. – С. 27-33.

Bogdanovich P.N., Chernopyatkin A.E.

Tribounit destruction at cyclic loading

The article deals with some peculiarities of friction and wear of the «bronze–steel» connection at continuous and periodic friction in the condition of forced maintenance of temperature of a lubricating material. It is proved that change over from the continuous sliding to the periodic one is accompanied by the growth of friction coefficient and intensity of metal wear. This effect is strengthened by lowering of contact pressure, acceleration of sliding and the number of «start–stop» cycles.

Поступила в редакцию 19.06.2014 г.

УДК 621.867.425.017(047)(476)

СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В КОНСТРУКЦИЯХ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ (ОБЗОР)

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

Выполнен анализ рациональных способов снижения динамических нагрузок в конструкциях ленточных конвейеров. Выявлены факторы, влияющие на амплитудно-частотные характеристики. Даны практические рекомендации по уменьшению ударных нагрузок и вибраций с целью повышения работоспособности и надежности стационарных машин и механизмов.

Введение

В современном массовом и крупносерийном производстве на предприятиях горнодобывающей, металлургической, строительной, химической и других отраслей промышленности широкое применение получили транспортирующие машины, среди которых важное место занимают конвейеры. Тесная связь конвейеров с общим технологическим процессом обуславливает их высокую ответственность [1-3]. Они устанавливают и регулируют темп производства, обеспечивают ее ритмичность, способствуют повышению производительности труда и увеличению выпуска продукции. Ленточные конвейеры, как наиболее экономичный и производительный вид транспорта массовых грузов, получили широкое распространение в нашей стране и за рубежом.

Однако, несмотря на широкий спектр применения ленточных конвейеров, проблема обеспечения их надежности и долговечности остается нерешенной. Одним из основных факторов, уменьшающих срок службы конвейеров, являются механические колебания или вибрации, которые оказывают негативное влияние на функционирование любой механической системы – ухудшают ее эксплуатационные характеристики: уменьшают долговечность, увеличивают нагрев деталей, снижают их прочность.

Невозможность достоверного расчета величин динамических нагрузок часто заставляет проектировщиков и конструкторов завышать коэффициенты запаса, снижать скорость транспортирования, разрабатывать сложные приводные механизмы, системы управления и т.п. [4, 5].

Многолетняя отечественная и зарубежная практика использования традиционных ленточных конвейеров различного назначения, исполнения и типоразмеров показывает, что все без исключения конвейеры имеют существенные недостатки, приводящие к следующим нежелательным явлениям:

- динамические колебания, вызванные падением груза в загрузочной секции конвейера;
- динамические колебания, вызванные высоким сопротивлением движению ленты на опорных роликах конвейера;
- боковое смещение ленты на барабанах и по трассе конвейера;
- динамические колебания, вызванные налипанием и намерзанием груза на ленту, ролики и барабаны конвейера;
- динамические колебания, вызванные пуском и остановкой конвейера.

Указанные выше принципиальные недостатки традиционных ленточных конвейеров, неизбежно приводящие к боковым смещениям и вертикальным колебаниям

ленты, обуславливают интенсивное абразивное и усталостное изнашивание ленты и роликов этих конвейеров и не позволяют достичь приемлемого срока их службы [6]. Поэтому в последние несколько десятилетий основное внимание научно-исследовательских и проектных институтов, промышленных предприятий было направлено на разработку и совершенствование методов уменьшения динамических нагрузок с целью повышения работоспособности и надежности ленточных конвейеров.

Анализ современных способов снижения динамических нагрузок в конструкциях ленточных конвейеров

Целью данной работы является анализ современных способов снижения динамических нагрузок в конструкциях ленточных конвейеров.

В соответствии с вышеперечисленными нежелательными явлениями важнейшей проблемой теории машин непрерывного транспорта является определение динамических нагрузок, вызванных в момент загрузки конвейера, поскольку и лента и ролики подвергаются значительным ударным нагрузкам. Анализ работ, посвященных созданию загрузочных устройств конвейеров, показывает, что снижение ударных нагрузок от загружаемых крупнодробленых и крупнокусовых грузов достигается следующими способами [7]: использованием специальных загрузочных узлов и механизмов, обеспечивающих минимальную высоту падения груза на несущее полотно и снижающих относительную скорость падающего куска груза к скорости принимающего конвейера; применением в пункте загрузки подсева мелочи с целью смягчения силы удара и расщепления ее величины на большую площадь; созданием специальных амортизирующих устройств или секций конвейеров, устанавливаемых в местах загрузки.

На сегодняшний день существует широкий спектр специальных загрузочных механизмов и узлов. Так на обогатительных фабриках нашла применение оригинальная конструкция – батутная подвеска, которая отличается наличием дополнительных жестких роlikоопор по краям загрузочной секции конвейера и заменой поддерживающих упругих элементов боковых роликов на сплошную упругую опору [8].

Рационально применение в зоне загрузки ленточных конвейеров опор скольжения из антифрикционных износостойких материалов, поддерживающих транспортирующую ленту. Такая конструкция по сравнению с жестким опорным основанием значительно снижает динамические воздействия от загружаемого материала на ленту и на опоры скольжения без каких-либо дополнительных элементов и узлов [9, 10]. При этом используется высокая амортизирующая способность синтетических материалов, применяемых в качестве опор скольжения, расположенных с определенным шагом по длине конвейера.

В шахтных ленточных конвейерах в местах загрузки используют подвесные шарнирные роlikоопоры, т.к. в них динамические усилия ниже в 2-3 раза, чем в подшипниках жестких роlikоопор, а величина коэффициента динамичности меньше в два раза [11].

Интересна конструкция еще одной амортизирующей опоры, которая имеет возможность взаимодействовать с опорной лентой [12]. Дополнительная опора выполнена в виде плоского подпружиненного элемента с жесткостью, большей жесткости опорной ленты, и воспринимает нагрузки от ленты, а посредством подпружиненного элемента гасит их.

В качестве амортизирующего элемента в устройстве поддержания ленты так же используют магнитное поле [13, 14]. В результате при действии одной и той же нагрузки уменьшаются прогиб и кривизна изгиба ленты в зоне контакта с падающим грузом. Кроме того, ввиду отсутствия поддерживающих роликов, снижается сопротивле-

ние при движении ленты, появляется возможность увеличения не только длины конвейера, но и скорости движения ленты, а, следовательно, и производительности [15].

Анализ опыта эксплуатации различных типов питателей и современных погружных устройств, показал их несовершенство, поскольку практически не существует таких конструкций, которые бы смогли обеспечить безударную укладку транспортируемого груза на полотно конвейера.

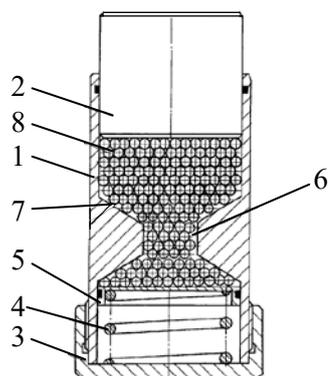
Второй рекомендуемый способ снижения динамических нагрузок – применение в пункте загрузки подсева мелочи с целью смягчения силы удара и рассредоточения ее величины на большую площадь, поскольку подсыпка обладает амортизирующими и распределяющими свойствами. Установлено, что применение подсыпки мелкой фракции с размерами частиц до 60 мм толщиной 50-100 мм позволяет снизить ударные нагрузки в 1,5-2 раза [16].

Сформировать такую смягчающую подушку можно либо в зоне загрузки, применяя загрузочное устройство с колосниками, либо по ходу движения ленты, используя явление сегрегации груза под воздействием вибрации, неизбежно возникающей на роликоопорах [17].

Однако создание подсыпки из мелкого материала не всегда возможно и зависит от гранулометрического состава груза, который сложно учесть при взаимодействии насыпного груза с опорными элементами конвейеров. Поэтому в настоящее время внимание исследователей уделяется экспериментальному определению характеристик насыпного груза, а также закономерностям взаимодействия между нагрузкой и параметрами опорных элементов. Так в работе [18] результаты экспериментальных исследований легли в основу математической моделей внешнего воздействия насыпного груза на элементы конвейера.

Для транспортирования крупнокусковых грузов наиболее приемлемым является третий способ снижения ударных нагрузок, т.е. установка в пунктах загрузки конвейеров специальных амортизирующих устройств. Так, например, рациональна установка демпфера (рисунок 1), содержащего корпус с внутренним кольцевым выступом с соосно установленными в нем поршнями, один из которых подпружинен, и рабочим телом в виде шариков, размещенных между поршнями [19].

Для поглощения вибраций используют также устройство упруго подвешенных агрегатов [20]. Оно содержит цилиндр, полость которого заполнена рабочим телом в



- 1 – корпус; 2 – поршень; 3 – крышка;
4 – пружина; 5 – подпружиненный поршень; 6 – дроссельное отверстие;
7 – усеченный конус; 8 – рабочее тело

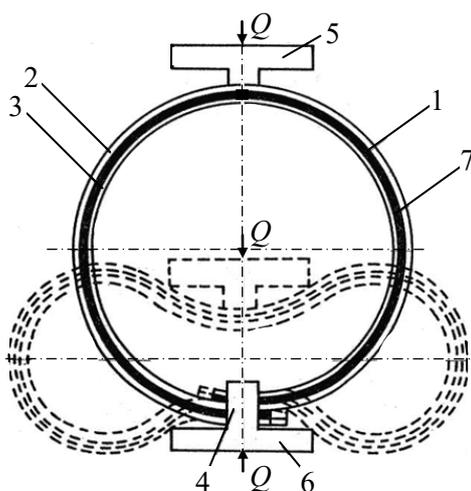
Рисунок 1 – Схема демпфера

виде сыпучего наполнителя, и установленные в нем встречно направленные поршни, один из которых подпружинен в осевом направлении, а другой предназначен для восприятия внешней нагрузки.

Для гашения ударных нагрузок и вибраций, возникающих в стационарных машинах и механизмах, применяется виброизолирующая опора, содержащая корпус и размещенный в нем пакет резинометаллических элементов, каждый из которых состоит из эластомерного виброизолятора [21]. При сжатии резиновых виброизоляторов и деформации наклонных стенок, работающих на изгиб, часть энергии затрачивается на трение, другая часть рассеивается в тепло, таким образом, осуществляется демпфирование.

Эффективную работу показало средство для гашения колебаний, содержащее две коаксиально расположенные одна внутри другой кольцевые детали (охватывающая и охватываемая), между которыми размещены рессоры [22]. Энергия колебаний в данном случае гасится в штырях, в том числе в месте трения штырей о место их посадки.

С этой же целью применяют устройство, выполненное в виде плоской спиральной ленты с витками, прижатыми друг к другу [23]. При воздействии на демпфирующий элемент происходит деформация плоской спиральной пружины, и за счет сил упругости происходит перемещение концов ленты друг относительно друга так, что контактирующие поверхности витков и спиральной ленты трутся друг о друга, поглощая энергию механических колебаний (рисунок 2).



Q – внешняя нагрузка; 1 – спиральная лента;
2, 3 – витки; 4 – соединительный элемент;
5 – объект; 6 – основание;
7 – фрикционный материал

Рисунок 2 – Схема устройства

Таким образом, авторы перечисленных выше исследований решают проблему снижения ударного воздействия транспортируемого материала на конвейер путем использования специальных загрузочных узлов и механизмов. Однако такие технические решения имеют ряд недостатков. Так загрузочные узлы с пружинными и резиноталлическими упругими элементами требуют постоянных замен демпферов по причине быстрого их износа. Загрузочные узлы с использованием опор скольжения с низким коэффициентом трения требуют постоянного контроля за их техническим состоянием из-за высоких требований к смазыванию и опасности перегрева. А проблемой загрузочных узлов с магнитной подвеской является неустойчивость ленты при работе.

Применение специальных амортизирующих устройств снижает воздействие от загружаемых крупнодробленых и крупнокусовых грузов, однако практика эксплуатации различных демпферов указывает на то, они могут успешно работать только под конкретные параметры колеблющейся системы.

На наш взгляд наиболее дешевым и рациональным способом уменьшения динамических нагрузок в загрузочной секции конвейера является создание изолирующей подушки из мелкокусового груза. Данный способ позволяет результативно гасить колебания и не требует существенного изменения конструкции конвейера, что немаловажно в модернизации уже эксплуатирующихся машин.

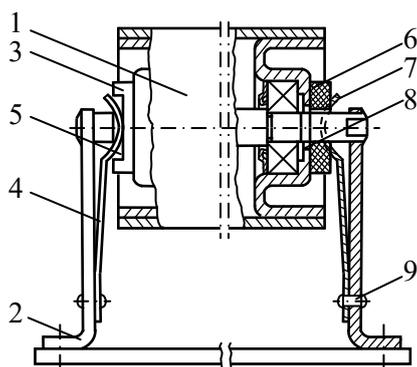
Анализ научно-технической литературы показал, что в последние годы особое внимание исследователи уделяют проблеме минимизации сопротивления движению ленты на опорных роликах, которые при эксплуатации испытывают большие динамические нагрузки, что в свою очередь оказывает существенное влияние на срок службы как ленты, так и роликов – самых дорогостоящих элементов конвейера. К настоящему времени уже накоплено значительное количество результативных технических решений. С целью совершенствования эксплуатационных характеристик ленточных конвейеров применяют роликоопоры из полимерных материалов нового типа, которые при

транспортировании грузов в агрессивных и абразивных средах превосходят по долговечности металлические роlikоопоры в два раза [24].

Часто в конвейерах высокое сопротивление движению ленты вызвано снижением работоспособности роликов, которые из-за отсутствия амортизирующих элементов не обладают демпфирующими способностями от поперечных динамических нагрузок. Эта проблема решена усовершенствованием конструкции ролика путем создания упруго-эластичной связи между подшипниками качения и осью ролика [25].

Также одним из способов решения этой проблемы является использование подвесных роlikоопор, которые позволяют улучшить динамические показатели при транспортировании и увеличить срок службы роlikоопор и ленты [26]. Существует конструкция желобчатой роlikоопоры, где центральный ролик опоры подпружинен по обеим сторонам от стойки, а боковые ролик подпружинены по внешним сторонам от стойки [27]. Пружины поглощают энергию от падающих грузов и сохраняют транспортную ленту от разрушений.

Интересна конструкция, компенсирующая влияние осевых смещений роlikоопор. Она состоит из роликов, установленных на опорном элементе и упругих элементов, выполненных в виде консольно-закрепленных пластин [28]. Обеспечение упругого прижатия плоской пружиной приводит к тому, что создаваемое ею усилие остается практически постоянным (рисунок 3). Это позволяет увеличить рабочий ход уплотнительных элементов и усилить их прижатие.



- 1 – ролик; 2 – опорный элемент;
3 – внешний уплотнительный элемент;
4 – упругий элемент; 5 – лыски, 6 – кольцевые канавки; 7 – лепестковые фиксаторы;
8 – манжета; 9 – фиксатор

Рисунок 3 – Схема устройства

Для повышения несущей способности ролика при улучшении его упругодемпфирующих свойств применяют устройство, состоящее из внешней и внутренней обойм [29]. Наружная поверхность внутренней обоймы выполнена граненой, а во внутренней обойме имеются щели, равномерно расположенные по окружности. При работе ролик из-за наличия сегментных щелей и отверстий имеет различные коэффициенты жесткости и динамичности в окружном и радиальном направлениях, что обеспечивает его упругодемпфирующие свойства.

Таким образом, использование подвесных амортизированных роlikоопор, а также роlikоопор из полимерных материалов позволяет существенно снизить динамические нагрузки, однако существенным недостатком использования податливых роlikоопор является увеличение сопротивления движению конвейерной ленты, а полимерных роlikоопор – ограниченный режим работы, поскольку при значительной скорости транспортировки они быстро выходят из строя.

Введение же амортизирующих элементов в конструкцию роликов позволяет повысить их несущую способность и обеспечить упругодемпфирующие свойства, что благоприятно сказывается на работе конвейера в целом.

Негативным фактором, влияющим на стабильную работу конвейера, является боковое смещение ленты. В результате появляются незатухающие периодические по-

перечные колебания, что ведет к дополнительным простоям конвейера и уменьшению срока службы самой ленты. В процессе работы на ленту действуют боковые силы, вызываемые следующими факторами: перекос роlikоопор в горизонтальной и вертикальной плоскостях; отклонение става от оси конвейера; неодинаковое сопротивление вращению боковых роlikоопор; непрямолинейность ленты в горизонтальной плоскости; несимметричное распределение натяжения по ширине ленты [30]; односторонняя загрузка ленты; налипание груза на барабанах и роliках [31].

Часто для решения проблемы схода ленты применяют бочкообразные приводные и натяжные барабаны, однако, как показывает анализ научно-технической литературы, такой способ центрирования не дает желаемый результат, поэтому в последнее время выравнивание ленты обеспечивается путем применения специальных центрирующих опор и устройств, обеспечивающих прямолинейность ее движения [30, 32].

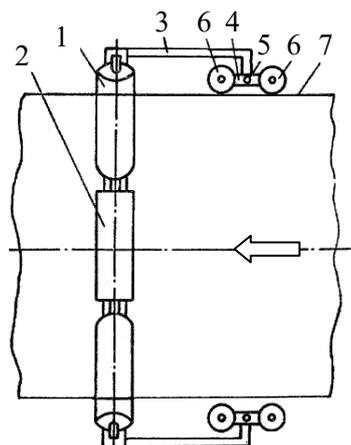
Так, для центрирования положения конвейерной ленты [33] используют конструкцию, содержащую наклонно расположенные конические роliки с возможностью их взаимодействия с бортами конвейерной ленты. При поперечном смещении ленты она вступает в контакт с коническим роlikом, и за счет сил трения увеличивается крутящий момент, который смещает ленту в сторону на исходное положение.

Известно еще одно оригинальное устройство для центрирования ленты конвейера, содержащее желобчатую роlikоопору, на которую опирается лента [34]. Опора состоит из роliков, размещенных на кронштейне, который имеет возможность поворота в горизонтальной плоскости. При движении ленты в сторону и возникновении смещающих ее поперечных воздействий на роlikоопору начинает действовать крутящий момент, который обеспечит возврат ленты в центральное положение.

Интерес представляет конструкция, состоящая из установленной на вертикальной оси роlikоопоры и рычагов с закрепленными на их концах двумя основными дефлекторными роliками (рисунок 4) [35]. При отклонении ленты от центрального положения она своей кромкой воздействует на дефлекторные роliки. При развороте роlikоопоры относительно рычага установленные на разных концах планки дефлекторные роliки будут одновременно находиться в контакте с кромкой ленты. Центрирующая сила, вызванная разворотом роlikоопоры, вернет ленту в центральное положение.

На некоторых конвейерах используют автоматическую центровку ленты на приводном барабане, регулирующую в широком диапазоне [36]. При этом с обеих сторон цилиндрического барабана имеются специальные центрирующие роliки с возможностью их регулирования в автоматическом режиме.

Таким образом, применение бочкообразных барабанов для центрирования ленты не дает положительного результата, применение же центрирующих опор или устройств обеспечивает выравнивание ленты, однако не полностью решает проблему, поскольку центрирующие роlikоопоры сами могут быть источником колебаний.



- 1 – роlikоопора; 2 – вертикальная ось;
3 – концы рычагов; 4 – концы планок;
5 – шарниры; 6 – дефлекторные роliки;
7 – кромка ленты

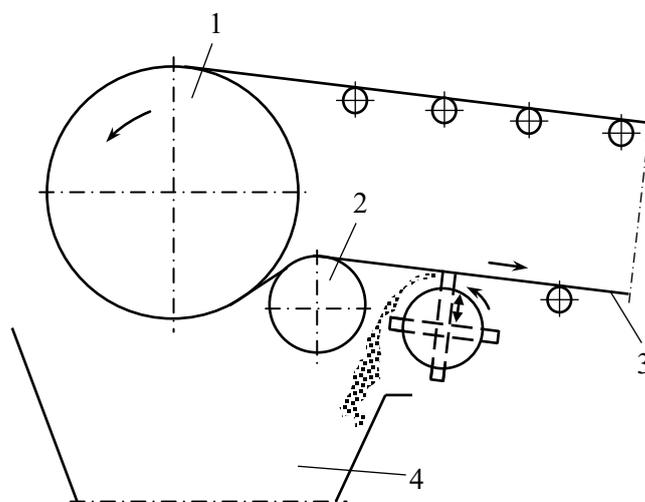
Рисунок 4 – Схема устройства

Особенно хочется отметить, что поперечные смещения лент традиционных ленточных конвейеров оказываются совершенно недопустимыми при транспортировании липких и мерзлых грузов, в частности, вследствие их неравномерного налипания или намерзания на образующие барабанов и роликов, которые в этом случае приобретают веретенообразную форму и децентрируют движущуюся по ним ленту. Кроме того, как показывает практика, в этом случае происходит заштыбовка подконвейерного пространства продуктами очистки ленты, неизбежно приводящая к аварийным простоям, которые при транспортировании указанных грузов в совокупности достигают 25-30 % от общих аварийных простоев конвейеров [37].

Налипание транспортируемого материала во многом зависит от конструктивных параметров самого конвейера: скорости движения ленты, шага установки роlikоопор, угла наклона боковых роликов, натяжения ленты, отношения длины бокового ролика к среднему, типа перегрузочного устройства, а также от параметров транспортируемого груза: коэффициента разрыхления, максимального размера кусков, влажности. В процессе транспортирования осевшая на ленте мелочь уплотняется и содержащаяся в ней связанная вода переходит в несвязную, которая отжимается вверх под действием импульсного воздействия от роlikоопоры и тем самым нарушает водяную пленку между материалом и лентой, что приводит к увеличению сил прилипания материала к ленте [38]. Поэтому, во избежание интенсивного налипания насыпных грузов следует выбирать длину транспортирования такой, при которой за время движения произойдет перераспределение фракций и разжижение пограничного с лентой слоя, но до полного выделения несвязной воды с пограничного слоя между лентой и материалом.

Кроме того, основными факторами замерзания транспортируемых грузов являются влажность и естественный температурный перепад. Для предотвращения налипания и намерзания горной массы на транспортное оборудование используют криогенную подготовку горной массы и применяют материалы рабочих поверхностей горного оборудования с низким коэффициентом теплоусвоения [39].

Для удаления загрязнений эффективно применение различных очистных механизмов. Так, например, известно устройство, выполненное в виде барабана, включающее обечайку, вал, на котором установлен барабан, и ряды гибких очистных элементов, установленных на барабане посредством тяг [40]. Его работа схематически изображена на рисунке 5.



1 – приводной барабан; 2 – отклоняющий барабан; 3 – холостая ветвь ленты; 4 – точка

Рисунок 5 – Схема работы устройства для удаления загрязнений

Эффективную работу продемонстрировала конструкция, содержащая системный держатель со скребковым элементом на шарнире и пружинное устройство, обеспечивающее прижатие скребка к ленте и очистку ее во время работы [41].

Иногда очистное устройство устанавливают перпендикулярно продольному направлению конвейерной ленты [42]. В этом случае оно полностью перекрывает ширину конвейерной ленты, а индивидуальные скребковые секции могут быть отогнуты либо в направлении конвейерной ленты, либо от нее.

Интересен способ виброочистки ленты конвейера, основанный на сообщении ей вынужденных колебаний путем приложения разночастотных ударных воздействий с частотами, равными частотам собственных изгибных колебаний ленты [43]. Хотелось отметить, что использование виброочистки вместо скребковой контактной очистки позволяет существенно (до 45 %) увеличить срок службы конвейерной ленты, так как реализуемые в процессе виброочистки силы контактного взаимодействия очистителя и ленты не оказывают существенного влияния на ее долговечность [44].

Для повышения качества очистки рабочей поверхности конвейерной ленты от сложных видов загрязнений применяют комбинированные устройства, состоящие из бесприводного вибрационного ролика и подвижного многоскребкового рабочего органа [45].

На некоторых современных предприятиях используют гидравлическую очистку конвейерной ленты – при помощи большого объема циркулирующей воды, которая омывает как верхнюю, так и нижнюю стороны ленты, после чего выводится вместе с загрязнениями и заменяется на свежую [46].

Таким образом, проанализировав разнообразные способы очистки конвейера от загрязнений, можно сделать вывод, что очистка способом контактной скребковой очистки приводит к возникновению дополнительной силы трения между скребком и лентой, что негативно сказывается на износе рабочей обкладки конвейерной ленты и рабочего органа самого очистителя; использование способа гидравлической очистки при помощи большого объема циркулирующей воды приводит к повышенной коррозии конвейера, кроме того конструкция такого очистительного устройства сложна и громоздка. Наиболее рациональным способом является вибрационная очистка конвейерной ленты, которая оказывает наименьшее негативное воздействие на конвейер. При наличии же сложных видов загрязнений эффективно использование комбинированного способа – виброочистки со скребком – который существенно повышает качество очистки рабочей поверхности.

Кроме того, выбор наиболее рациональных соотношений параметров ленточного конвейера (скорость транспортирования, ширина ленты, шаг роликоопор, угол наклона боковых роликов) позволяет избежать налипания насыпных грузов. Интенсивного замерзания грузов можно не допустить путем использования технических средств на основе криогенной подготовки горной массы и применения материалов с низким коэффициентом теплоусвоения.

Надежность работы конвейера во многом зависит от динамических нагрузок, возникающих в переходных режимах и, прежде всего, при пуске и остановке конвейера. Так, при пуске привод конвейера должен иметь характеристику с постепенным увеличением пускового момента до начала трогания конвейерной ленты и ограничение величины момента в процессе разгона ленты до номинальной скорости, иначе резкое приложение усилий может вызывать повышенный износ ленты, а в некоторых случаях и ее разрыв.

Негативным фактором, влияющим на работу конвейера, является наличие запаса мощности двигателей, которые определяют повышенные нагрузки, формируемые приводом при пуске механизма [47]. Динамическая составляющая этих нагрузок оказыва-

ется значительной при пусках вхолостую, либо с небольшими нагрузками. Причем, характерной особенностью рассматриваемых механизмов является наличие в кинематических цепях зубчатых зацеплений, упругих связей, которые определяют возникновение дополнительной динамической нагруженности.

Для ограничения нагрузок в механизмах с сухим или граничным трением предлагается использовать устройство [48], которое за счет использования свойств инерции сердечника позволяет изменять индуктивность катушки и формировать желаемые механические характеристики двигателя.

Для плавного пуска и регулирования скорости конвейеров используют механизм, функционирование которого построено на повышении коэффициента мощности путем синхронизации работы управляемого выпрямителя и роторного коммутатора [49].

Повысить надежность запуска конвейера можно, используя модернизированный электропривод путем исключения влияния величины активной мощности, измеренной в аварийных и переходных режимах при его отключении [50]. Время разгона при каждом пуске (кроме первоначального) выбирается пропорциональным величине активной мощности (при отключении), считываемой из карты памяти.

Большое количество научных работ посвящены исследованиям переходных процессов, вызванных включением двигателя на соответствующее напряжение или внезапным приложением нагрузки [51]. При этом особую трудность представляет анализ динамических процессов и нагрузок в различных режимах работы транспортирующих машин [52], в том числе и особых аварийных, которые по своему физическому содержанию относятся к неустановившимся процессам (стопорение, обрыв конвейерной ленты). Надежную синхронную работу электродвигателей в различных режимах работы способен обеспечить многодвигательный асинхронный электропривод конвейера [53].

Действенным способом ограничения динамических нагрузок при пуске является применение регулируемых муфт [54], которые позволяют запускать двигатель вхолостую, а после его разгона обеспечивают плавный разгон тягового органа без пробуксовки ленты с ограничением динамических перегрузок, кроме того, регулируемые муфты дают возможность применения асинхронных двигателей без ограничений по мощности.

Широкое применение в ленточных и кордных транспортерах, дробилках, смесителях нашли пусковые муфты из прорезиненной кордовой высокоэластичной ткани с высокой усталостной прочностью и повышенной упругостью, которые смягчают влияние изменения величин крутящих моментов, гасят вибрации, а также компенсирует неточности установки соединяемых систем [55].

Для плавной передачи вращения используют регулируемые гидродинамические муфты, в которых крутящий момент от насосного колеса передается через жидкость на турбинное колесо и ведомый вал, тем самым обеспечивается плавность передачи [56].

Для регулирования, распределения и торможения вращательного движения целесообразно применение устройства-тормоза [57]. Оно состоит из корпуса, заполненного ферромагнитной жидкостью, куда помещены ведущая и ведомая полумуфты, расположенные параллельно друг другу, индуктора магнитного поля, создающего магнитное поле перпендикулярно осям вращения полумуфт. Так при вращении ведущая полумуфта увлекает за собой ведомую посредством находящейся между ними ферромагнитной жидкости.

Таким образом, использование дополнительных устройств, а именно – регулируемых муфт и различных систем регуляторов по частоте и моменту, позволяет снизить динамические нагрузки, возникающие при пуске и торможении конвейера. Однако частые пуски конвейера могут приводить к нагреву регулируемых муфт, к срабатыванию

защиты либо выплескиванию рабочей жидкости, поэтому использование муфт должно быть обосновано режимом работы конвейера.

Вывод

Как показал проведенный анализ научно-технической литературы, в настоящее время проводится большая работа в области теоретических и экспериментальных исследований в области конвейеростроения. Однако не существует единого алгоритма действий, позволяющих обеспечить надежность работы на протяжении всего срока эксплуатации конвейера. Поэтому усилия исследователей направлены, прежде всего, на определение факторов, оказывающих негативное влияние на прочность и долговечность машин непрерывного транспорта, а также на разработку способов и методов их ограничения.

Список использованных источников

1. **Волчкевич, Л.И.** Комплексная автоматизация производства / Л.И. Волчкевич, М.П. Ковалев, М.М. Кузнецов. – М.: Машиностроение, 1983. – 269 с.
2. **Егоров, В.А.** Транспортно-накопительные системы для ГПС / В.А. Егоров, В.Д. Лузанов, С.М. Щербаков. – Л.: Машиностроение, 1989. – 294 с.
3. **Коновалов, В.С.** Организация, механизация и экономика заводского транспорта / В.С. Коновалов. – М.: Машиностроение, 1988. – 136 с.
4. **Бидерман, В.Л.** Теория механических колебаний / В.Л. Бидерман. – М.: Высшая школа, 1980. – 408 с.
5. **Фролов, К.В.** Вибрации в технике: справочник в 6 т. / К.В. Фролов. – М.: Машиностроение, 1980. – 544 с.
6. **Галкин, В.И.** Критерий работоспособности тканевых конвейерных лент при оценке их надежности / В.И. Галкин, В.Г. Дмитриев // Горный журнал. Известия вузов. – 2000. – № 2. – С. 59-62.
7. **Ахметова, Ш.Д.** Исследование методов снижения нагрузок на полотно конвейера / Ш.Д. Ахметова, А.Т. Бахтиярова // Журнал машиностроение. – 2013. – № 1. – С. 60-64.
8. **Кочнева, О.В.** Повышение надежности загрузочных секций распределительных конвейеров обогатительных фабрик: автореф. дис. ... канд. техн. наук / О.В. Кочнева. – Иркутск, 2006. – 21 с.
9. Ленточный конвейер на опорах скольжения: пат. 2068380 РФ, МПК В 65 G 15/62 / Д.В. Дмитриев [и др.]. – № 940433887/03; заявл. 14.12.1984; опубл. 27.10.1996. – Бюл. – 1996. – № 15. – С. 10.
10. **Голицин, С.В.** Обоснование рациональных параметров опор скольжения ленточных конвейеров в зоне загрузки: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С.В. Голицин. – Санкт-Петербург, 2004. – 28 с.
11. **Галкин, В.И.** Исследование динамических нагрузок и выбор конструктивных параметров роликкоопор шахтных ленточных конвейеров: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.И. Галкин. – М., 1975. – 32 с.
12. Загрузочная секция ленточного конвейера: пат. 1765072 СССР, МПК В 65 G 15/62, Н 04 J 39/12 / Е.Е. Новиков [и др.]. – № 4707939/03; заявл. 21.06.1989; опубл. 30.09.1992. – Бюл. – 1992. – № 36. – С. 4.
13. Конвейер на магнитной подушке: пат. 20080087526 США, МПК В 65 G 21/20 / Джон Форман. – № 874007/11; заявл. 11.01.2006; опубл. 17.10.2007. – Бюл. – 2007. – № 21. – С. 19.

14. **Захаров, А.Ю.** Системы магнитного подвеса в ленточных конвейерах для транспортирования крупнокусковой горной массы: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.Ю. Захаров. – Кемерово, 2001. – 25 с.
15. **Пешков, С.В.** Обоснование параметров магнитных элементов, встроенных в ленту конвейера: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С.В. Пешков. – Кемерово, 2009. – 28 с.
16. **Жанузаков, И.С.** Исследование технологических параметров и эффективности применения крутонаклонного пластинчатого конвейера при подземной разработке месторождений: автореф. дис. ... канд. техн. наук / И.С. Жанузаков. – Алма-Ата, 1978. – 24 с.
17. **Ерофеева, Н.В.** Исследование сегрегации груза на ленточном конвейере под воздействием ударных импульсов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н.В. Ерофеева. – Кемерово, 2011. – 34 с.
18. **Монастырский, В.Ф.** Результаты экспериментальных исследований потока насыпного груза / В.Ф. Монастырский, О.В. Кочнева // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2006. – № 3. – С. 47-51.
19. Демпфер: пат 2010129 РФ, МПК F 16 F 9/30 / В.Н. Юткин, А.Н. Шмаков. – № 4949986/28; заявл. 27.06.1991; опубл. 30.03.1994. – Бюл. – 1994. – № 30. – С. 5.
20. Амортизатор: пат 968537 СССР, МПК F 16 F 9/30 / Э.И. Савин. – № 2732329/25-28; заявл. 06.03.1979; опубл. 23.10.1982. – Бюл. – 1982. – № 39. – С. 4.
21. Виброизолирующая опора: пат 2029157 РФ, МПК F 16 F 11/00 / Н.Н. Рахманов. – № 5002196/28; заявл. 02.08.1991; опубл. 20.02.1995. – Бюл. – 1995. – № 30. – С. 3.
22. Механический демпфер и его рессора: пат 2235234 РФ, МПК F 16 F 15/121 / Б.Н. Громько, Б.И. Алексеев, С.В. Гусев, И.Д. Постников. – № 2002115706/11; заявл. 14.06.2002; опубл. 27.08.2004. – Бюл. – 2004. – № 33. – С. 10.
23. Демпфирующий элемент: пат 1195089 СССР, МПК F 16 F 1/34 / А.П. Еремеев, М.Р. Закарян, А.И. Красников. – № 3788411/25-28; заявл. 12.09.1984; опубл. 30.11.1985. – Бюл. – 1985. – № 44. – С. 4.
24. **Пан, Б.С.** Исследование конвейерных роликоопор, выполненных из конструкционных полимерных материалов нового типа: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Б.С. Пан. – Ташкент, 1984. – 28 с.
25. Ролик ленточного конвейера: пат 2097296 РФ, МПК В 65 G 39/09 / Э.А. Ткаченко. – № 95118697/03; заявл. 01.11.1995; опубл. 27.11.1997. – Бюл. – 1997. – № 23. – С. 6.
26. **Яхонтов, Ю.А.** Развитие теории и разработка методов расчета ленточных конвейеров с подвесными роликоопорами для горных предприятий: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ю.А. Яхонтов. – М., 2005. – 33 с.
27. Роликоопора ленточного конвейера: пат 2209757 РФ, МПК В 65 G 39/14 / А.М. Бахолдин, И.А. Деревянкин. – № 2002106307/03; заявл. 11.03.2002; опубл. 10.08.2003. – Бюл. – 2003. – № 39. – С. 4.
28. Роликоопора ленточного конвейера: пат 1402514 СССР, МПК В 65 G 39/09, В 65 G 39/12 / Н.Я. Биличенко [и др.]. – № 4138720/27-03; заявл. 16.07.1986; опубл. 15.06.1988. – Бюл. – 1988. – № 22. – С. 5.
29. Ролик демпфирующий: пат 1532734 СССР, МПК F 16 C 19/24 / Н.Н. Васильев, М.П. Золотарь, Ю.Н. Шлюпиков. – № 4409199/25-28; заявл. 13.04.1988; опубл. 30.12.1989. – Бюл. – 1989. – № 48. – С. 2.
30. **Щеглов, О.М.** О форме барабанов ленточных конвейеров / О.М. Щеглов, П.А. Гринько // Подъемно-транспортное дело. – М. – 2011. – № 1. – С. 2-5.
31. **Спиваковский, А.О.** Транспортирующие машины / А.О. Спиваковский, В.К. Дьячков. – М.: Машиностроение, 1983. – 487 с.

32. **Гринько, П.А.** Проблемы центрирования хода ленты ленточного конвейера / П.А. Гринько, О.М. Щеглов, Р.В. Суглубов // Подъемно-транспортное дело. – М.: – 2012. – № 8. – С. 10-12.
33. Центрирующие устройство для конвейерной ленты: пат 2488539 РФ, МПК В 65 G 15/60, В 65 G 39/16 / Ю.Д. Тарасов. – № 2012106665/11; заявл. 22.02.2012; опубл. 27.07.2013. – Бюл. – 2013. – № 21. – С. 7.
34. Устройство для центрирования ленты конвейера: пат 2332345 РФ, МПК В 65 G 39/00 / Ю.Д. Тарасов. – № 200712541/11; заявл. 04.04.2007; опубл. 27.08.2008. – Бюл. – 2008. – № 24. – С. 6.
35. Устройство для центрирования ленты конвейера: пат 1738738 СССР, МПК В 65 G 39/071 / В.М. Юрченко, Н.П. Неверов, С.П. Мироедов. – № 4695931/03; заявл. 29.05.1989; опубл. 07.06.1992. – Бюл. – 1992. – № 21. – С. 2.
36. **Зотов, В.В.** Методы устранения смещения ленточного тягового органа на приводном барабане подъемной установки / В.В. Зотов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 11. – С. 269-275.
37. **Ивченко, В.Н.** Обоснование рациональных параметров и разработка конструкции несущих элементов конвейера с подвесной лентой: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.Н. Ивченко. – Брянск, 2009. – 21 с.
38. **Комар, В.Л.** Установление рациональных параметров ленточных конвейеров для карьеров промышленности строительных материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.Л. Комар. – М., 1984. – 36 с.
39. **Сытник, А.В.** Разработка способов, предотвращающих налипание и намерзание горной массы на добычное и транспортное оборудование в погодноклиматических условиях Севера: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.В. Сытник. – М., 1984. – 33 с.
40. Устройство для очистки ленты конвейера: пат 1583335 СССР, МПК В 65 G 45/00 / П.Т. Сичкарь. – № 4497075/27-03; заявл. 12.09.1988; опубл. 07.08.1990. – Бюл. – 1990. – № 29. – С. 4.
41. Скребок очиститель барабана: пат 2309883 РФ, МПК В 65 G 45/16 / Х.О. Шварце. – № 2005106853/11; заявл. 13.06.2003; опубл. 10.11.2007. – Бюл. – 2007. – № 31. – С. 26.
42. Скребок для ленточного транспортера: пат 2356817 РФ, МПК В 65 G 45/16 / К. Ховсте, К.А. Гаарден. – № 2006123098/11; заявл. 01.12.2004; опубл. 27.05.2009. – Бюл. – 2009. – № 15. – С. 15.
43. Способ вибрационной очистки ленты конвейера и устройство для его осуществления: пат 2009087 РФ, МПК В 65 G 45/00 / П.И. Петренко, В.П. Петренко. – № 4942277/03; заявл. 06.06.1991; опубл. 15.03.1994. – Бюл. – 1994. – № 45. – С. 8.
44. **Кондрахин, В.П.** Оценка влияния виброочистки на срок службы конвейерной ленты / В.П. Кондрахин, Е.М. Арефьев, Н.В. Хиценко // Вестник ХНАДУ. – 2012. – № 57. – С. 43-47.
45. **Бибиков, П.Я.** Установление рационального типа и параметров механических очистных устройств ленточных конвейеров горных предприятий по переработке нерудного сырья: автореф. дис. ... канд. техн. наук / П.Я. Бибиков. – М., 2009. – 26 с.
46. Устройство для очистки холостой ветви ленты конвейера: пат 1666414 СССР, МПК В 65 G 45/00 / Ю.С. Бадеев, А.В. Ни. – № 461791/03; заявл. 12.12.1988; опубл. 30.07.1991. – Бюл. – 1991. – № 28. – С. 3.
47. **Леоненко, А.С.** Ограничение динамических нагрузок в механизмах машин и оборудования обогатительных фабрик: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.С. Леоненко. – Иркутск, 2000. – 28 с.

48. Устройство для ограничения динамических нагрузок в механизмах с сухим или граничным трением: пат 2126197 РФ, МПК Н 02 Р 7/36, Н 02 Р 7/40 / Д.Е. Махно, С.С. Леоненко, А.С. Леоненко. – № 97118190/09; заявл. 03.11.1997; опубл. 10.02.1999. – Бюл. – 1999. – № 36. – С. 8.

49. Электропривод ленточного конвейера: пат 1493568 СССР, МПК В 65 G 43/00 / В.М. Назаренко [и др.]. – № 3986952/31-03; заявл. 11.12.1985; опубл. 15.07.1989. – Бюл. – 1989. – № 26. – С. 4.

50. Устройство для запуска конвейера: пат 1708716 СССР, МПК В 65 G 43/10 / Г.И. Лошкарёв, Н.И. Сонин, М.Е. Полицкий. – № 4793637/03; заявл. 19.02.1990; опубл. 30.01.1992. – Бюл. – 1992. – № 4. – С. 8.

51. **Кремешная, А.А.** Исследование пусковых режимов шахтных ленточных конвейеров с учетом переходных процессов в приводах / А.А. Кремешная // Сборник научных работ II междунар. науч.-технич. конф. аспирантов и студентов в Донецке. – Донецк, 2002. – № 2. – С. 128-131.

52. **Ткаченко, А.А.** Анализ динамических процессов в двухприводном скребковом конвейере СР72 в различных технологических режимах / А.А. Ткаченко, А.В. Осичева // Электротехнические компьютерные системы. – 2011. – № 8 – С. 182-184.

53. **Акпанбетов, Д.Б.** Трехдвигательный асинхронный электропривод синхронного вращения шахтного ленточного конвейера / Д.Б. Акпанбетов, Д.Ж. Сарсембаев // Вестник ПГУ. – 2010. – № 4. – С. 87-92.

54. **Леоненко, А.С.** Разработка и исследование асинхронного электропривода горных транспортеров и эскалаторов метро с трансформаторно-тиристорными регулирующими устройствами: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.С. Леоненко. – Л., 1984. – 35 с.

55. Муфта диафрагменная: пат. 71391 РФ, МПК F 16 D 3/74 / В.В. Титов, Е.С. Шувалов. – № 20071113/03; заявл. 14.04.2007; опубл. 10.03.2008. – Бюл. – 2008. – № 14. – С. 5.

56. Регулируемая гидродинамическая муфта: пат 889946 СССР, МПК В 65 G 33/02 / И.С. Зарх, Л.Н. Баталин. – № 2888497/25-27; заявл. 07.01.1980; опубл. 15.12.1981. – Бюл. – 1981. – № 46. – С. 2.

57. Регулируемая муфта-тормоз: пат. 2170374 РФ, МПК F 16 D 37/02 / К.А. Шухмин. – № 99116343/28; заявл. 28.07.1999; опубл. 10.07.2001. – Бюл. – 2001. – № 20. – С. 9.

Kuzyomkin D.M., Dovgyalo V.A.

Ways of dynamic load reduction in designs of belt conveyors (review)

The analysis of rational ways of dynamic load reduction in designs of belt conveyors is carried out. Factors affecting amplitude-frequency characteristics are revealed. The authors give some practical advice on reduction of impact load and vibration for increasing the performance and durability of stationary machines and mechanisms.

Поступила в редакцию 19.05.2014 г.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 666.263.2

КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ ТАРНОГО СТЕКЛА И АЛЮМООКСИДНОЙ КЕРАМИКИ

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

В статье рассмотрены некоторые аспекты получения композиционных материалов на основе стекла системы $R_2O-RO-SiO_2$ и оксида алюминия в виде порошков глинозема марки ГК и алунда марки КО. Определены некоторые механические и теплофизические свойства полученных материалов. Указаны области возможного использования.

Введение

Композиционные материалы (КМ) на основе электровакуумных стекол С48-1, С52-1 (С49-2) и С52-2 с различными наполнителями широко используются для получения вакуумплотных металлостеклянных спаев, для изготовления электрических изоляторов, электротехнической гарнитуры. Эти стекла разрабатывались специально для спаивания с коваром (сплав 29НК), имеют малый коэффициент термического расширения, низкую температуру размягчения, но достаточно дороги. Представляет интерес возможность использования в КМ дешевых, широко распространенных стекол, а возможно и их отходов.

В качестве основы КМ стекловидной матрицы было выбрано стекло системы $R_2O-RO-SiO_2$, широко используемое в стекольной промышленности для стеклотары. Химический состав таких стекол обычно: SiO_2 – 70,5-72,5 мас. %, Al_2O_3 – 2,0-2,5 мас. %, CaO – 7,0-10,0 мас. %, MgO – 1,0-3,0 мас. %, K_2O – 1,0-2,0 мас. %, Na_2O – 12,0-14,0 мас. % [1, 2].

В качестве наполнителя в КМ использован порошок оксида алюминия Al_2O_3 в виде глинозема марки ГО (по ГОСТ 30558-98 Глинозем неметаллургический); глинозема марки ГК (по ГОСТ 30559-98 Глинозем неметаллургический); алунда электровакуумного марки КО по [3].

Эти материалы различаются содержанием примесей, фазовым составом, строением частиц и их размерами (таблица 1).

Глинозем марки ГО содержит значительное количество фазы $\gamma-Al_2O_3$, очень мелкие (до 1 мкм) частицы которого агрегированы в сферолиты размером 60-100 мкм. Основной кристаллической фазой глинозема марки ГК и алунда марки КО является $\alpha-Al_2O_3$. Размер частиц до 10 мкм у глинозема марки ГК и до 3 мкм – у алунда.

Получение композиционных материалов

Исходное стекло измельчали термодроблением до кусков размером 1-10 мм, хорошо просушивали в электрошкафу при температуре 250 °С. Далее стекло измельчали в фарфоровых барабанах уралитовыми шарами до удельной поверхности $S_{уд} = 500-600 \text{ м}^2/\text{кг}$. С целью предотвращения агрегатирования частиц в барабан вводили 0,3 мас. % этилового спирта. На окончательной стадии помола к порошку стекла до-

бавляли порошок наполнителя и все перемешивали в течение одного часа. Из порошков композиции на лабораторной шликерной мешалке приготавливались термопластичные шликеры со связкой, состоящей из 90 мас. % парафина и 10 мас. % воска. Расчетное содержание связки в шликерах 13 мас. %. Фактическое содержание связки в шликерах составило 13-15 мас. %. Вязкость таких шликеров составила 1,1-1,3 Па·с, предельное напряжение сдвига – 530 Па.

Таблица 1 – Фазовый состав и дисперсность корундовых материалов

Марка материала	Средний размер частиц, мкм	Распределение частиц по фракциям, мас. %				Содержание фаз, мас. %			
		0-3	3-6	6-9	9-21	высокопрокаленных		низкопрокаленных	
						α -Al ₂ O ₃	α -Al ₂ O ₃ + γ -Al ₂ O ₃	γ -Al ₂ O ₃	γ -Al ₂ O ₃ + бемит-сод. фазы
глинозем ГО	1	100	-	-	-	6,1*	31,6*	59,5*	1,8*
глинозем ГК	5-6	7***	52***	26***	15***	85-95**	-	5-15**	-
Алунд КО	1,8-2,5**	80-90**	5-18**	0,5-5**	менее 1,0**	99	-	1	-
* согласно [4] ** согласно [3] *** измеренные									

Из шликеров методом горячего литья под давлением на литьевой машине У-141 были отформованы штапики 5,4×8,5×60,0 мм для оценки свойств полученных материалов. Режим литья подбирался для каждого шликера, средние параметры составили: температура шликера при формовании – 72-82 °С, давление формования – 2-6 атм. Не допускалось наличие в отливках раковин, крупных пузырей, пустот, свилей.

Выжигание связки проводили в печи электрической типа СНОЛ-1,6 в никелевых лодочках в засыпке техническим глиноземом. Скорость подъема температуры до 650 °С устанавливалась 5 °С/мин.

Спекание проводили в печи СНОЛ-1,6,2,5. 1/9-И5. Скорость подъема температуры – 100 °С/ч, выдержка при температуре спекания 1 час. Режим спекания подбирался индивидуально для каждого состава. За температуру спекания $T_{сп}$ условно принята температура термообработки, после которой водопоглощение спека не превышало 0,1 %, то есть материал считался спеченным.

По вышеописанной технологии были получены КМ на основе стекла, содержащие 20-60 мас. % наполнителя – глинозема ГО и ГК, алунда КО.

Опробование показало, что глинозем марки ГО в состоянии поставки не может быть использован в КМ без его предварительной подготовки: отпрессованные заготовки получались рыхлые, неоднородные из-за плохого перемешивания агрегированных частиц глинозема со стеклом. С целью получения диоксида алюминия с преобладающей α -Al₂O₃ фазой, глинозем марки ГО обжигали в электрической печи КО-14 (Германия) с силитовыми нагревателями при температуре 1300-1450 °С. Установлено, что наиболее плотные образцы получают из глинозема, отожженного при 1400 °С в течение примерно 4-х часов и затем помолотого в течение 30 часов.

Результаты исследований

Установлено, все КМ, содержащие в качестве наполнителя различные формы Al_2O_3 в одинаковых количествах, обладают близкими свойствами. Следует отметить лишь незначительные различия.

Материалы, полученные с наполнителем глиноземом ГО, имеют повышенную пористость (меньшую кажущуюся плотность). Возможными причинами могут быть:

- неполный переход $\gamma-Al_2O_3$ в $\alpha-Al_2O_3$ в процессе высокотемпературной обработки;
- неполный размол сферолитов;
- активация частиц глинозема в процессе размола, более прочная адгезия молекул органической связки и продуктов их разложения на поверхности частиц.

Исследование причин повышенной пористости не проводили – сочли целесообразным использовать в качестве наполнителя глинозем марки ГК и алунд КО, материалы на основе которых лишены указанного недостатка.

Опробование и изучение некоторых свойств КМ показали, что материалы, содержащие более мелкие частицы алунда КО, имеют меньшую $T_{сп}$ и более высокую теплопроводность. Материалы, содержащие более крупные частицы глинозема ГК, имеют чуть большую прочность на изгиб и более высокий термический коэффициент линейного расширения (ТКЛР) (таблица 2). Однако различия свойств настолько малы, что имеет смысл говорить об их идентичности.

Полученные КМ можно условно разделить на 3 группы:

- 1 – содержащие до 40 мас. % наполнителя;
- 2 – содержащие 50-60 мас. % наполнителя;
- 3 – содержащие 90-99 мас. % наполнителя.

Таблица 2 – Составы и некоторые свойства КМ, полученные по оптимальным режимам спекания

Содержание компонентов, мас. %			Температура спекания $T_{сп}$, °C	Водопоглощение B , %	Плотность ρ , кг/м ³	Предел прочности на изгиб $\sigma_{изг}$, МПа	Удельное сопротивление $lg \rho$	Диэлектрическая проницаемость ϵ при $T=20$ °C, $f=1$ МГц	$tg \delta \cdot 10^4$ при $T=20$ °C, $f=1$ МГц
стекло	алунд КО	глинозем ГК							
100	0		700	0,01	2,48	59	13-14	7,0	34
80	20		750	0,1	2,60	80	13-14	7,0	32
75	25		750	0,1	2,58	82	13	7,3	30
70	30		800	0,1	2,61	92	13-12	7,0	27
60	40		900	0,1	2,62	88	12-13	8,8	23
50	50		900	0,5	2,34	54	12-13	8,0	30
40	60		990	1,0	2,18	48	13	8,0	30
80		20	780	0,1	2,58	85	12-13	7,2	34
70		30	810	0,4	2,60	89	12-13	7,2	30
60		40	950	0,3	2,61	84	12-13	8,8	28
50		50	1000	0,5	2,26	84	12-13	8,6	26

Материалы, содержащие до 40 мас. % наполнителя (таблица 2) ведут себя вполне предсказуемо – спекаются до минимальной открытой пористости и имеют усадку

примерно 10 %. Аномальными свойствами обладают материалы, содержащие 50 и 60 % наполнителя. В частности, спекание образцов из этих материалов до величины водопоглощения $B - 1,1$ % происходит уже при 800 °С, при этом усадка оказывается чрезвычайно небольшая ($0,8$ %), что нехарактерно для таких материалов. Причем величина усадки оказывается одинаковой для материалов, спеченных при 850 , 900 и 950 °С. При этом не наблюдается характерного для этих материалов оплавления.

Изучены некоторые свойства КМ, полученных на основе стекла системы $R_2O-RO-SiO_2$ и оксида алюминия в виде глинозема марки ГК и алунда марки КО в качестве наполнителя по оптимальным режимам спекания. Результаты представлены в таблице 2.

Плотность. С увеличением содержания наполнителя до 40 мас. % плотность КМ возрастает с $2,48$ кг/м³ у материала без наполнителя до $2,62$ кг/м³ у материала, содержащего 40 мас. % алунда (рисунок 1). На этом отрезке кривой изменение плотности достаточно точно описывается уравнением аддитивности:

$$\rho = \sum_{i=1}^N \rho_i x_i$$

где ρ_i – плотность фазы;
 x_i – ее содержание в материале.

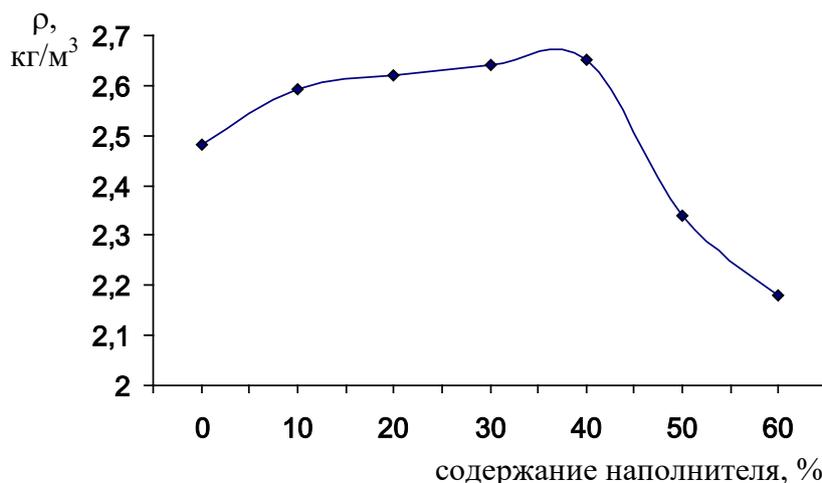


Рисунок 1 – Плотность КМ с различным содержанием наполнителя

С увеличением содержания наполнителя свыше 40 мас. %, плотность спеченных материалов резко падает, что указывает на возрастание закрытой пористости материалов. Меняется характер спекания композиционного материала: у материалов, содержащих до 40 мас. % наполнителя, ярко выраженный характер жидкостного спекания – внутренние поры, образовавшиеся после выгорания технологической связки, заполняются жидкой стеклофазой, на что указывает значительная усадка композиционного материала и их высокая плотность. При содержании наполнителя в композиционном материале более 40 мас. % механизм спекания меняется – «свободной» жидкой фазы недостаточно для заполнения всех образовавшихся пустот, жидкая фаза обволакивает частицы наполнителя и происходит прилипание образовавшихся конгломератов друг к другу. Минимальная усадка материалов, их низкая плотность указывают именно на такой механизм спекания.

Механическая прочность. Механическая прочность на изгиб КМ с увеличением содержания наполнителя с 0 до 40 мас. % возрастает значительно от ~60 МПа до 90 МПа (рисунок 2).

Наибольшей механической прочностью обладают материалы, содержащие 30 мас. % алунда и глинозема ГК. При дальнейшем увеличении содержания наполнителя до 50 и 60 мас. % прочность материалов снижается, что вызвано повышением неоднородности структуры КМ за счет увеличения количества пор и раковин. По-видимому, это вызвано снижением толщины жидкостной прослойки между зёрнами наполнителя. При содержании наполнителя ~30 мас. % эта величина близка к оптимальной. Другой возможной причиной повышения $\sigma_{изг}$ является упрочнение тонких слоев жидкой фазы за счет химического взаимодействия ее с материалом наполнителя (образуется стекло иного состава, возможно более прочное).

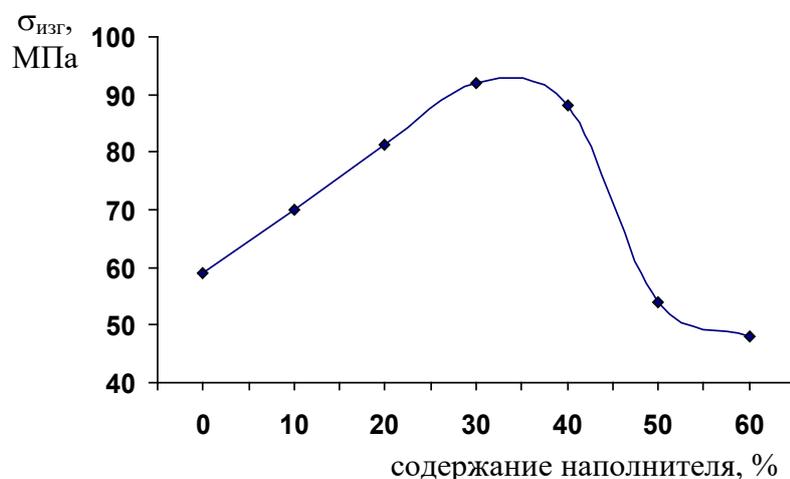


Рисунок 2 – Механическая прочность КМ с различным содержанием наполнителя

Были изучены некоторые теплофизические свойства полученных КМ: теплопроводность, теплоемкость и коэффициент термического расширения.

Композиционные материалы являются, по меньшей мере, двухфазными системами, кроме того, они содержат значительное количество пор. Естественно предположить, что их теплофизические свойства будут определяться величинами теплоемкости C , теплопроводности λ и коэффициента термического линейного расширения α , входящих в них компонентов (таблица 3), соотношением фаз, пористостью.

Таблица 3 – Теплофизические свойства материалов, входящих в состав КМ

Материал	Теплопроводность, Вт/(м·К) при температуре			Теплоемкость, Дж/(кг·К) при температуре			ТКЛР $\alpha \cdot 10^7, K^{-1}$ в интервале температур 20-300 °С	Температура трансформации, $T_g, ^\circ C$
	20 °С	500 °С	1000 °С	20 °С	500 °С	1000 °С		
алунд [3]	25	9	5	836	1006	1089	80	-
стекло системы $R_2O-RO-SiO_2$ [1, 5]	0,844	-	-	837	-	-	89	460

Результаты измерений представлены в таблицах 4, 5.

Таблица 4 – Теплофизические свойства КМ на основе стекла и керамики

Содержание наполнителя в КМ, мас. %	Теплопроводность, Вт/(м·К), при температуре				Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К), при температуре			Примечание
	50 °С	100 °С	200 °С	200 °С расч.	50 °С	100 °С	200 °С	
10	1,29	1,39	1,66	1,77	892	947	1057	$S_{уд}$ -4200 г/см ²
20	1,39	1,63	1,79	2,68	944	969	1087	$S_{уд}$ -4200 г/см ²
30	1,50	1,59	1,72	3,60	957	937	1038	$S_{уд}$ -4200 г/см ²
40	1,72	2,00	2,05	4,51	950	967	1042	$S_{уд}$ -4200 г/см ²
50	2,25	2,20	2,32	5,43	918	942	1031	$S_{уд}$ -4200 г/см ²
30	1,08	1,37	1,60		847	939	1107	$S_{уд}$ -6200 г/см ²
40	1,18	1,28	1,42		951	982	1036	$S_{уд}$ -6200 г/см ²

Таблица 5 – Термический коэффициент расширения и температура начала деформации КМ с различным содержанием наполнителя

Содержание компонентов, мас. %		Термический коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^7, K^{-1}$, в интервале температур					Температура начала деформации $T_{нд}, °C$
стекло	алунд КО	20-200 °С	20-300 °С	20-400 °С	20-500 °С	20-300 °С расч.	
100	0	85	90	92	94	90	560
90	10	84	88	90	92	89	560
80	20	81	86	87	88	88	580
70	30	75	80	84	87	87	670
60	40	75	78	82	84	86	695
50	50	71	74	78	81	85	720
40	60	70	72	76	79	84	-

Теплоемкость практически одинакова у материалов с различным содержанием наполнителя. С возрастанием содержания керамики с 10 до 30 мас. % теплоемкость КМ незначительно возрастает, затем снижается у материалов, содержащих 40 и 50 мас. % керамики. Установить какую-то зависимость и объяснить полученные результаты затруднительно, поскольку, согласно литературным источникам [1, 3, 5], теплоемкость стекла и корундовой керамики практически одинакова.

С увеличением температуры теплоемкость КМ возрастает (рисунок 3). По характеру изменения теплоемкости полученные композиционные материалы подобны стекловидным материалам.

Теплопроводность λ полученных КМ возрастает с увеличением содержания в них керамики. С увеличением температуры теплопроводность полученных КМ возрастает. По величине теплопроводности и характеру ее изменения, согласно рисунку 4, они более подобны стекловидным материалам.

Полученные экспериментальные данные в значительной степени расходятся с рассчитанными по приведенной выше формуле. По-видимому, как и для двухфазной керамики справедливо, что теплопроводность КМ определяется теплопроводностью той фазы, которая образует сплошную матрицу. При нарушении сплошности матрицы

теплопроводность двухфазной керамики имеет среднюю величину. Поскольку при 50 % содержании наполнителя не наблюдается резкого повышения λ , можем сделать вывод, что стекла хватает для образования сплошной матрицы.

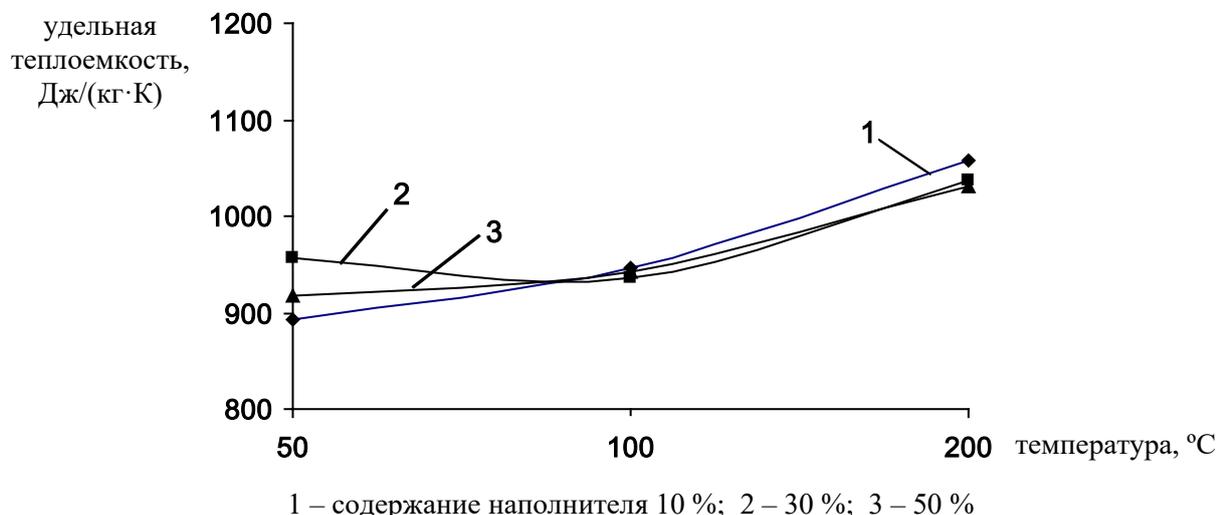


Рисунок 3 – Теплоемкость КМ с различным содержанием наполнителя

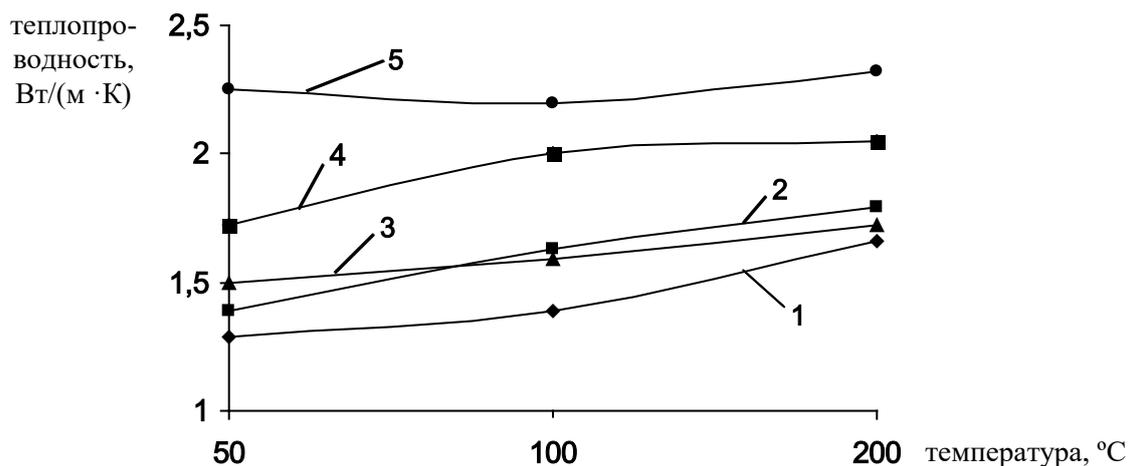
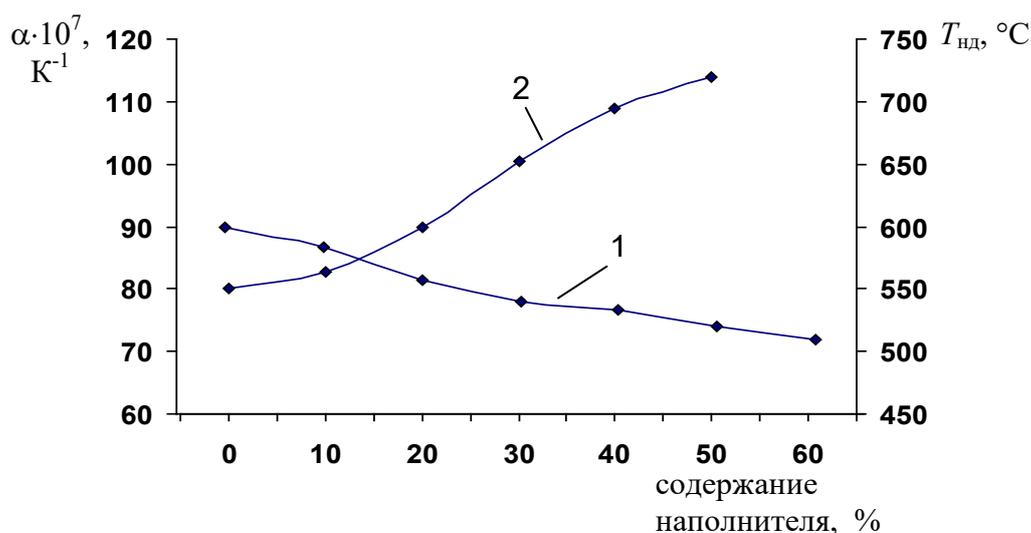


Рисунок 4 – Теплопроводность КМ с различным содержанием наполнителя

Термический коэффициент линейного расширения. Вид кривых ТКЛР КМ на основе стекла, содержащих 10-40 мас. % наполнителя, подобен кривым ТКЛР стекол: на них четко просматриваются перегибы, соответствующие температуре трансформации T_g и температуре начала деформации $T_{нд}$. ТКЛР материалов, содержащих 10-20 мас. % наполнителя, незначительно отличается от ТКЛР матричного стекла. С увеличением содержания наполнителя, согласно рисунку 5, ТКЛР монотонно понижается, растет их $T_{нд}$. Повышение $T_{нд}$ указывает на повышение вязкости КМ при температурах, превышающих T_g , что приводит к ухудшению их спекаемости, повышению температуры спекания.

На кривых ТКЛР материалов, содержащих 50 мас. % наполнителя, характерные перегибы размыты, а у материалов с 60 мас. % наполнителя – отсутствуют вообще.



1 – термический коэффициент линейного расширения КМ $\alpha \cdot 10^7, \text{K}^{-1}$;
 2 – температура начала деформации КМ $T_{\text{нд}}, \text{°C}$

Рисунок 5 – Термический коэффициент линейного расширения и температура начала деформации КМ с различным содержанием наполнителя

Полученные данные совпадают с расчетными только для материалов, содержащих малое количество наполнителя (20 %), при большем содержании наполнителя снижение ТКЛР происходит значительно быстрее.

Анализ теплофизических свойств полученных КМ позволил сделать вывод, что по величинам теплофизических свойств и характеру их изменения с ростом температуры КМ на основе стекла системы $\text{R}_2\text{O-RO-SiO}_2$, содержащие до 60 мас. % алунда марки КО, подобны стекловидным материалам.

Композиционные материалы с высоким содержанием наполнителя

Особое место в ряду разработанных КМ на основе стекла и керамики занимают материалы с высоким (более 90 %) содержанием наполнителя.

Были приготовлены композиции, содержащие 1-10 мас. % порошка стекла с $S_{\text{уд}} = 500-600 \text{ м}^2/\text{кг}$ и 90-99 мас. % керамического наполнителя в виде алунда марки КО. Из композиций методом полусухого прессования изготовлены образцы прямоугольной формы $5 \times 5 \times 60 \text{ мм}$. Спекание проводили в лабораторной электрической печи СВК 5163.00.00.00 с хромитлантановыми нагревателями в окислительной атмосфере (на воздухе) и в вакуумной печи СШВ-1.2,5/25-И2 в условиях глубокого вакуума при температуре 1250-1500 °С. Некоторые свойства полученных материалов приведены в таблице 6.

Установлено, что по свойствам полученные материалы подобны высокоглиноземистым керамическим материалам. Для материалов с содержанием наполнителя 1-5 мас. % характерны высокие температуры спекания 1400-1600 °С. Они обладают хорошими диэлектрическими и теплофизическими свойствами, относительно высокой механической прочностью, отличной износостойкостью.

Изучено влияние условий спекания на некоторые свойства материалов. Установлено, что наиболее плотной структурой и наибольшей механической прочностью

обладают материалы, спеченные в условиях вакуума. Менее плотные материалы получают при спекании в окислительной среде.

Таблица 6 – Некоторые свойства КМ с высоким содержанием наполнителя

Состав КМ		Условия спекания	Температура спекания, °С	Плотность, г/см ³	Пористость откр., %	Водопоглощение, %	Микротвердость, кг/мм ²	Предел прочности на изгиб, МПа
алунд КО	стекло							
90	10	воздух	1250	3,60	0,21	3,6	1150	140
95	5	воздух	1350	3,75	1,98	1,5	1310	200
99	1	воздух	1500	2,82	1,82	1,2	1480	180
90	10	вакуум	1200	3,89	0,36	2,1	1280	180
95	5	вакуум	1300	3,75	0,09	1,2	1380	230
99	1	вакуум	1500	3,76	0,08	1,4	1460	210

По некоторым свойствам полученные КМ не в полной мере отвечают современным мировым требованиям – в частности, по величине открытой пористости и механической прочности. Однако использование известных технологических приемов – введение в состав дополнительных активаторов спекания – позволяет прогнозировать возможность улучшения этих свойств.

Выводы

Получены композиционные материалы на основе стекла и керамики с широким диапазоном свойств. Условно полученные материалы можно разделить на четыре группы:

- композиционные материалы, содержащие до 20 % керамического наполнителя – Al_2O_3 в форме алунда марки КО или глинозема марки ГК. Эти материалы имеют низкую температуру спекания, обладают хорошими диэлектрическими свойствами. Однако механическая прочность их низкая. Они могут быть использованы для спаев с металлами и керамикой, согласующимися с ними по ТКЛР, в гермовводах, проходных изоляторах, корпусах интегральных схем и полупроводниковых приборов. Была изготовлена опытная партия проходных изоляторов;

- композиционные материалы, содержащие 30-40 % наполнителя Al_2O_3 . Эти материалы имеют температуру спекания 900-910 °С, обладают хорошими диэлектрическими свойствами, достаточной механической прочностью. Они могут быть использованы в различного типа изоляторах, электрических колодках, разъемах. Была изготовлена опытная партия изоляторов патронов Е27;

- композиционные материалы, содержащие 50-90 % наполнителя Al_2O_3 . Эти материалы имеют более высокую температуру спекания 950-1000 °С, характеризуются повышенной пористостью и низкой механической прочностью. Такие материалы могут быть использованы для получения фильтрующих керамических материалов, основы различного рода катализаторов;

- композиционные материалы, содержащие 90-99 % керамического материала Al_2O_3 . По своим свойствам они подобны высокоглиноземистым керамическим материалам. Им присущи высокие температуры спекания 1400-1600 °С, они обладают хорошими диэлектрическими и теплофизическими свойствами, высокой механической прочностью, отличной износостойкостью. В зависимости от температуры и времени спекания можно получить материалы различной пористости. Такие материалы могут быть использованы для деталей пар трения тяжелонагруженных узлов нитепроводящей гарнитуры и во многих других областях промышленного производства. Была изготовлена опытная партия нитепроводителей волоконного производства.

Список использованных источников

1. Справочник по производству стекла / И.И. Китайгородский [и др.]. – Том 1. – М., 1963. – 1030 с.
 2. Химическая технология стекла и ситаллов / М.В. Артамонова [и др.]. – 1983. – 432 с.
 3. Технические условия ЩеО 027.000 ТУ.
 4. Технология стекла // Под общ. ред. И.И. Китайгородского. – М.: Издательство по строительству, 1967. – 360 с.
 5. Балкевич, В.Л. Техническая керамика / В.Л. Балкевич. – М.: Издательство по строительству, 1968. – 200 с.
-

Pavlenko A.P.

Composite material based on container glass and alumina ceramics

The article describes some aspects of producing composite materials based on glass of $R_2O-RO-SiO_2$ system and aluminum oxide in powder form of alumina mark GK and alundum mark KO. Certain mechanical and thermophysical properties of the obtained materials are described. Areas of possible utilization are specified.

Поступила в редакцию 10.07.2014 г.

УДК 621.74:669.13

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ХРОМИСТЫХ ЧУГУНОВ

Барановский К.Э., Урбанович Н.И., Волосатиков В.И., Басалай И.А., Розенберг Е.В. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь), Дувалов П.Ю. («Институт технологии металлов» Национальная академия наук Беларуси, г. Могилев, Беларусь)

В статье представлены результаты исследований по сравнению механических свойств и износостойкости наиболее распространенных в СНГ и Республике Беларусь износостойких хромистых чугунов. Показано, что применение нового износостойкого чугуна и специальных методов литья позволяет повысить износостойкость и механические свойства деталей.

Введение

Эксплуатационные характеристики современных износостойких хромистых чугунов (ИЧХ) определяются наличием, образующихся при высоких содержаниях хрома, специальных карбидов Me_7C_3 и $Me_{23}C_6$ и дополнительных легирующих элементов (молибдена, никеля, ванадия, и др.). Детали, испытывающие абразивный износ, работают в условиях возможных ударных нагрузок, поэтому кроме износостойкости важнейшим критерием работоспособности является ударная вязкость и прочность. В связи с этим, разработка составов новых ИЧХ, обеспечивающих сочетание высокой износостойкости и твердости, наряду с удовлетворительной прочностью, пластичностью и ударной вязкостью, является весьма актуальной.

Основная часть

Возможность использования износостойких хромистых чугунов в тех или иных условиях эксплуатации определяется не только их износостойкостью, но и механическими свойствами. Поэтому представляет интерес сравнение износостойкости и механических свойств наиболее часто применяемых в промышленности ИЧХ.

В качестве эталона был выбран наиболее распространенный в СНГ и Республике Беларусь износостойкий хромистый чугун – ИЧХ28Н2 (25-30 % Cr, 1,5-2,0 % Ni). В настоящее время из этого сплава изготавливается большая номенклатура отливок (детали насосов для перекачки агрессивных веществ, защита и броня размольного оборудования и т.д.).

Широко применяется хромомолибденовый чугун ИЧХ16М3 (15-19 % Cr, 1-3 % Mo), из него производят дробеметные лопатки, облицовку размольного оборудования и т.д. Благодаря молибдену, этот чугун обладает высокой прокаливаемостью и используется, в основном, в термообработанном состоянии (закалка) [1].

Комплексно легированный молибденом, никелем, ванадием чугун ИЧХ18 (17-19 % Cr, 0,5 % Mo, 0,4 % V, Ni до 0,8 %) хорошо зарекомендовал себя для деталей строительного оборудования, почвообрабатывающей техники, машиностроения [1].

Чтобы получить сопоставимые результаты по структуре и твердости, образцы из разных сплавов отливались в одинаковые песчаные формы. Для уменьшения влияния содержания углерода во всех случаях применялись чугуны эвтектического состава, содержащие 3,2-3,5 % углерода. В литом и термообработанном состояниях исследовались

механические свойства: твердость, предел прочности при растяжении, ударная вязкость. Режим термообработки для всех чугунов был следующим: закалка с 960-980 °С на воздухе, отпуск при 200 °С – 2 часа.

В условиях лабораторных ускоренных испытаний изучена относительная износостойкость чугунов ИЧХ28Н2, ИЧХ16М3, ИЧХ18 в литом и термообработанном состояниях. Испытания образцов из ИЧХ проводили в режиме сухого трения с плоскопараллельным перемещением абразивного материала (электрокорунд с размером зерна 0,1-0,063 мм). Коэффициент относительной износостойкости определялся как отношение потери массы при испытаниях эталонного и испытуемого образцов. В качестве эталонного использовали образец из чугуна ИЧХ28Н2 в литом состоянии с твердостью 52-53 HRC. В таблице 1 приведены полученные результаты.

Таблица 1 – Механические свойства и относительная износостойкость хромистых чугунов в литом и термообработанном состояниях

Марка чугуна	ИЧХ28Н2	ИЧХ18	ИЧХ16М3
твердость в литом состоянии, HRC	52-53	55	54-55
твердость в термообработанном состоянии (закалка), HRC	61	65	67
предел прочности при растяжении в литом состоянии, МПа	395	325	267
предел прочности при растяжении в термообработанном состоянии, МПа	402	341	315
ударная вязкость в литом состоянии, Дж/см ²	11,4	10,5	6,4
ударная вязкость в термообработанном состоянии, Дж/см ²	10,5	8,6	5,8
коэффициент относительной износостойкости чугунов в литом состоянии	1	2,2	2,8
коэффициент относительной износостойкости чугунов в термообработанном состоянии	2,9	5,5	5,7

Как видно из таблицы 1, наименьшую износостойкость имеет чугун ИЧХ28Н2 в литом состоянии. Термообработка повышает износостойкость всех чугунов, особенно ИЧХ18 и ИЧХ16М3, в результате имеющих мартенситную металлическую матрицу. В тоже время термообработка снижает наиболее значимый для ИЧХ параметр – ударную вязкость (все износостойкие хромистые чугуны имеют невысокую ударостойкость). Наибольшей ударной вязкостью обладает чугун ИЧХ28Н2 в литом состоянии.

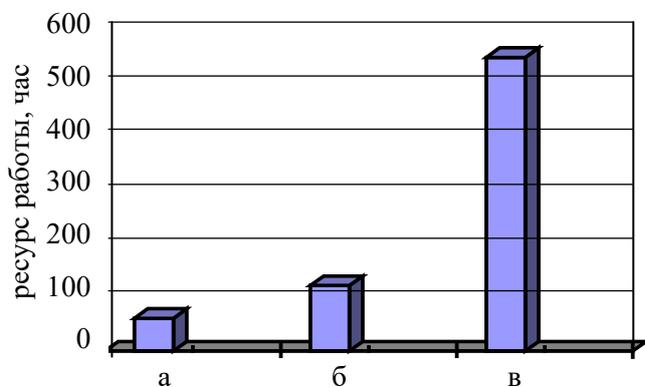
В Республике Беларусь более 90 % деталей из ИЧХ изготавливается из сплава ИЧХ28Н2, он разрабатывался для работы в коррозионно-абразивных условиях [2]. Замена этого чугуна для работы в абразивных средах на более износостойкий и дешевый чугун является актуальной. Следует отметить, что чугун ИЧХ28Н2 обладает высокими механическими свойствами (прочностью при растяжении и ударной вязкостью), поэтому использование сплавов ИЧХ16М3 и ИЧХ18 как заменителей ИЧХ28Н2 проблематично, так как эти чугуны имеют более низкие механические свойства и дороги из-за высокого содержания легирующих элементов.

В «Институте технологии металлов» Национальной академии наук Беларуси и Белорусском национальном техническом университете разработан экспериментальный износостойкий хромистый чугун содержащий 16-20 % Cr и экономно легируемый (Mn, W, V, Ni, Mo) [3]. Механические свойства и износостойкость разработанного чугуна ИЧХ18ВМ и сплавов ИЧХ28Н2 и ИЧХ16М3 представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Механические свойства и относительная износостойкость хромистых чугунов

Марка чугуна	ИЧХ28Н2 (литой)	ИЧХ16М3 (закалка)	Разработанный износостойкий чугун ИЧХ18ВМ (закалка)
твердость, HRC	52-53	67	66
ударная вязкость, Дж/см ²	11,4	5,8	13,5
предел прочности при растяжении, МПа	395	315	425
коэффициент относительной износостойкости*	1	5,7	5,9
*эталон – чугун ИЧХ28Н2 в литом состоянии (испытания в лабораторных условиях)			

Разработанный чугун имеет более высокую износостойкость и механические свойства, чем самый распространенный в Беларуси и СНГ сплав ИЧХ28Н2. Его стоимость существенно ниже, чем у сплавов ИЧХ28Н2 и ИЧХ16М3 при более высоких механических свойствах и износостойкости. В настоящее время из разработанного сплава изготавливаются детали оборудования по производству кирпича из глины, работающие в абразивной среде и имеющие ресурс работы не ниже, чем из сплава ИЧХ16М3. Детали центробежных мельниц из сплава ИЧХ18ВМ при размоле кварцевого стекла показали ресурс работы в 8-9 раз выше, чем такие же детали из сплава ИЧХ28Н2 в литом состоянии [4]. На рисунке 1 показан ресурс работы отбойных плит центробежной мельницы МЦ-0.63.



а – плита из чугуна ИЧХ28Н2 (литое состояние);
б – из чугуна ИЧХ28Н2 (закалка);
в – из чугуна ИЧХ18ВМ (закалка)

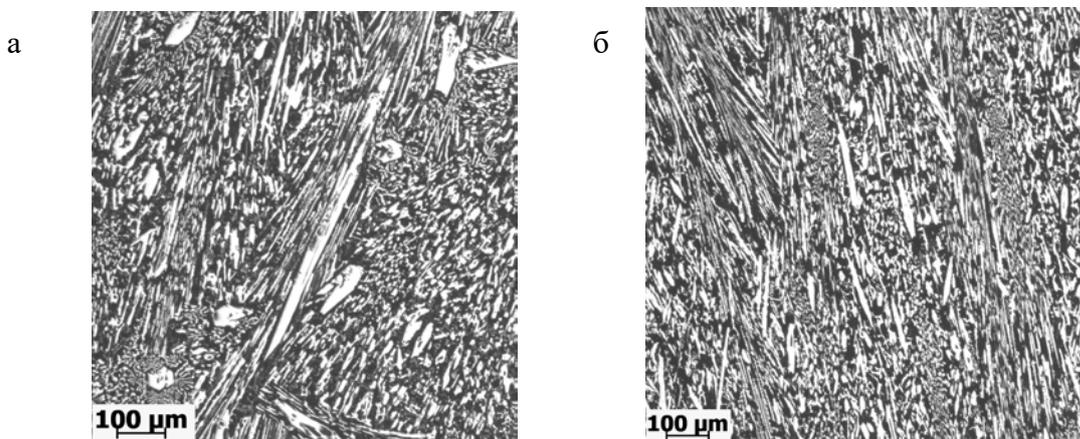
Рисунок 1 – Ресурс работы отбойных плит

Как видно из рисунка 1, термообработка повышает износостойкость ИЧХ28Н2 в 2 раза, а износостойкость термообработанного сплава ИЧХ18ВМ в 9 раз превосходит ИЧХ28Н2 в литом состоянии. Стоит отметить, что при размолу более твердых и прочных веществ, таких как песок, гранит и др., разница в износостойкости ИЧХ28Н2 и ИЧХ18ВМ менее значительна, так как твердость чугунов сопоставима с твердостью размалываемых веществ [5], но во всех случаях износостойкость ИЧХ18ВМ выше, чем у ИЧХ28Н2.

Дальнейшее увеличение износостойкости чугунов возможно за счет использования специальных методов литья в кокиль и комбинированные формы [6]. Верхняя часть комбинированной формы изготавливается из песчаной смеси, а для получения рабочей поверхности отливки используется металлическая плита. Кокили представляют собой полностью металлические формы. Использование этих методов обеспечивает ускоренное охлаждение отливок и направленное затвердевание, что позволяет получить:

- более мелкую макро- и микроструктуру отливок;
- ориентированную карбидную фазу в направлении, перпендикулярном износу;
- высокую твердость отливок.

На рисунке 2 показаны структуры отливок из износостойкого чугуна ИЧХ18ВМ, полученные литьем в земляную форму (а) и в металлическую форму (кокиль) (б).



а – литье в земляную форму; б – литье в металлическую форму (кокиль)

Рисунок 2 – Структуры чугуна ИЧХ18ВМ, полученные различными методами литья, ×100

Сравнительный анализ микроструктур чугуна показал, что структура чугуна, полученного в кокиль, имеет в 3-4 раза более мелкие карбиды, чем при литье в земляные формы. Твердость рабочей поверхности деталей, литых в земляные формы, составляет 54-55 HRC, а литых в кокиль 59-61 HRC.

Опыт применения деталей из износостойких чугунов, полученных в кокили и комбинированные формы, показал увеличение износостойкости в 1,2-2 раза по сравнению с деталями, полученными в земляные формы. Все детали имеют равномерную твердость по толщине, в них отсутствуют пористость и внутренние дефекты. В кокили и комбинированные формы в настоящее время изготавливаются: защита центробежных дробилок, отбойные плиты центробежных мельниц (детали, о которые измельчается материал), детали строительной техники и т.д. На рисунке 3 показаны примеры литых деталей.

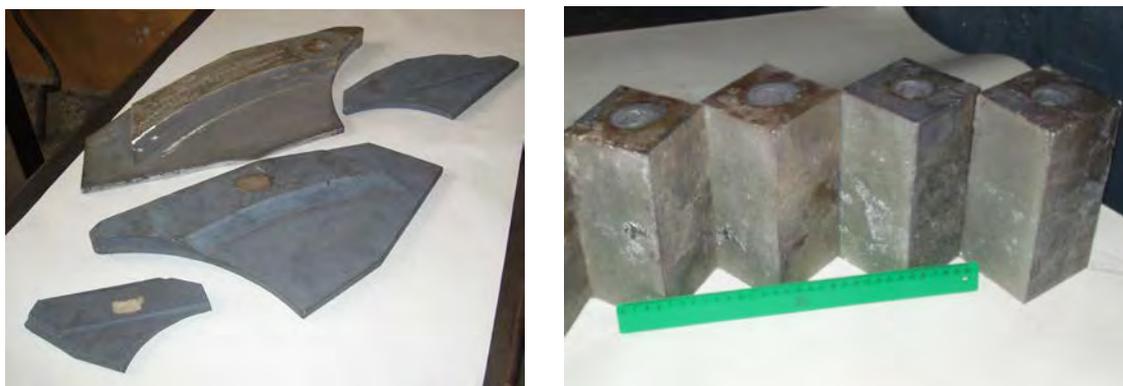


Рисунок 3 – Литые детали, полученные в комбинированные формы и кокили

В «Институте технологии металлов» Национальной академии наук Беларуси и Белорусском национальном техническом университете проводятся работы по увеличению износостойкости деталей из хромистых чугунов. Коллектив авторов может разра-

ботать новые составы износостойких чугунов, внедрить технологии изготовления отливок в комбинированные формы, кокили и земляные формы, а также изготовить опытные партии деталей весом до 30 кг. В проведении вышеназванных работ могут быть заинтересованы специалисты горнодобывающей и горно-перерабатывающей промышленности, а так же машиностроения.

Заключение

Проведены исследования механических свойств и износостойкости широко используемых износостойких хромистых чугунов: ИЧХ28Н2, ИЧХ18, ИЧХ16М3. Показано, что наиболее распространенный в СНГ и Республике Беларусь чугун ИЧХ28Н2 уступает по износостойкости другим чугунам, но имеет высокие механические свойства. Разработан износостойкий чугун ИЧХ18ВМ, обладающий более высокой износостойкостью и механическими свойствами. Налажено производство деталей из этого чугуна. Показано, что дальнейшее увеличение износостойкости деталей возможно за счет использования специальных методов литья в комбинированные и металлические формы.

Список использованных источников

1. **Барановский, К.Э.** Оценка применимости износостойких хромистых чугунов для изготовления литых деталей оборудования по производству кирпича из глины / К.Э. Барановский, В.М. Ильюшенко // Литье и металлургия. – 2007. – № 4. – С. 110-112.
2. Исследование абразивно-коррозионной стойкости хромистых чугунов / Е.И. Рожкова [и др.] // Литейщик России. – 2005. – № 12. – С. 8-9.
3. Износостойкий чугун: пат. 14155 Респ. Беларусь, МПК С 22 С 37/00 / В.М. Ильюшенко, К.Э. Барановский; заявитель ГНУ «Институт технологии металлов НАН Беларуси». – № а 20090689; заявл. 13.05.09; опубл. 30.04.11 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 2. – С. 103.
4. **Барановский, К.Э.** Износостойкие литейные сплавы для деталей мельниц по размолу стекла / К.Э. Барановский, В.М. Ильюшенко // Центробежная техника – высокие технологии: материалы 3-й междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2008. – С. 46-48.
5. **Клейс, И.Р.** Износостойкость элементов измельчителей ударного действия / И.Р. Клейс, Х.Х. Ууэмыйс. – М.: Машиностроение, 1986. – 160 с.
6. **Барановский, К.Э.** Литье деталей из износостойких хромистых чугунов для центробежных мельниц в комбинированные формы и кокили / К.Э. Барановский, В.М. Ильюшенко // Литье и металлургия. – 2009. – № 3. – С. 162-164.

Baranovsky K.E., Urbanovich N.I., Volosatikov V.I., Basalai I.A., Rozenberg E.V., Duvalov P.Yu.

Wear resistance and mechanical properties of the chromic cast irons

Results of researches on comparison of mechanical properties and wear resistance of the most widespread in the CIS and Republic of Belarus wearproof chromic cast irons are presented in the article. It is shown that use of new wearproof cast irons and special methods of molding allows to increase wear resistance and mechanical properties of details.

Поступила в редакцию 02.07.2014 г.

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

1. Материал статьи должен соответствовать профилю журнала и излагаться предельно ясно.
2. Поступившие в редакцию статьи проходят рецензирование. Основные критерии целесообразности опубликования – актуальность тематики, научная новизна.
3. Статья должна быть представлена в распечатанном и в электронном виде в формате текстового редактора Microsoft Word (97-2010). Шрифт текста Times New Roman, размер 12 п., интервал – 1.
4. В статье должны быть указаны индекс УДК, название статьи, фамилии авторов, наименования организаций, в которых работают авторы. Статья должна содержать: аннотацию (до 10 строк), введение, основную часть, заключение, завершаемое четко сформулированными выводами, список использованных источников. Аннотация и название статьи, а также фамилии авторов должны быть представлены на английском и русском языках.
5. Рисунки должны быть четкими черно-белыми 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 black-and-white 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.

Подписные 749332
индексы: 74933

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

- разработка горношахтного подъемно-транспортного оборудования;
- разработка горного проходческого, очистного и бурового оборудования;
- разработка технологического горно-обогачительного оборудования;
- разработка методов повышения надежности и долговечности деталей и узлов машин, работающих в условиях абразивных, химически активных сред горно-обогачительных предприятий;
- разработка оборудования для комплексов по перегрузке и складированию сыпучих материалов;
- разработка высокопроизводительной технологии 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;
- совершенствование технологии 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 автоматизированных систем управления горношахтным добывающим и перерабатывающим оборудованием.

Адрес редакции:

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

Телефоны:

(+375 174) 26 28 37 главный редактор (приемная)
(+375 174) 26 35 32 ответственный секретарь
E-mail: ontipr@tut.by

ISSN 1728-3841



9 771728 384000

<http://www.sipr.by>