

Подписные 749332
индексы: 74933

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

ISSN 1728-3841

ЖМП

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ №1 2014

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-обогательного оборудования;
- разработка методов повышения надежности и долговечности деталей и узлов машин, работающих в условиях абразивных, химически активных сред горно-обогательного оборудования;
- 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 месторождении;
- моделирование и автоматизированное проектирование горных машин, работающих на глубине более 1000 м во взрывоопасной среде и при больших давлениях;
- 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: ontiiipr@tut.by

<http://www.sipr.by>

№ 1, 2014

ГОРНАЯ МЕХАНИКА
и машиностроение

ISSN 1728-3841



9 771728 384000

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

№ 1 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
Зяц Ирина Михайловна

Редакционная коллегия:

Андрейко С.С. – доктор технических наук, проф.
Богданович П.Н. – доктор технических наук, проф.
Данилов В.А. – доктор технических наук, проф.
Журавков М.А. – доктор физ.-техн. 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: ontiiipr@tut.by

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

- Журавков М.А.** Техногенные динамические события в регионах крупномасштабного освоения подземного пространства. Часть 1. Возможно ли техногенное динамическое событие большой интенсивности как следствие крупномасштабного освоения подземного пространства? 5
- Пузанов Д.А., Мозговенко М.С., Губанов В.А.** Результаты исследования устойчивости вскрывающих выработок при их проведении в подработанном нижней лавой IV силвинитовом слое на руднике 3 РУ ОАО «Беларуськалий» 25
- Злотников И.И., Хило П.А., Прушак В.Я., Ахмадиева Л.В., Шаповалов В.М.** Исследование особенностей молекулярного взаимодействия при разрушении горных пород с использованием технологических жидкостей 34
- Губанов В.А., Пузанов Д.А., Мозговенко М.С., Михеев И.А.** Выбор мест заложения подготовительных выработок при их проведении в охранных междустолбовых целиках через 25-30 лет после завершения очистных работ в смежноотработанных лавах... 43
- Березовский Н.И., Борисейко В.В.** Инновационные энерго- и ресурсосберегающие технологии производства брикетов из торфа 48
- Поляков А.Л., Мисников В.А., Лутович Е.А., Шафиков М.Г., Якубович Н.Н.** Анкерная крепь первого уровня крепления, пригодная для механизированной установки. Лабораторные испытания ее отдельных узлов и элементов 56

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Лустенков М.Е.** Обоснование выбора механических передач для работы в скважинах.. 64
- Кучик А.С., Михаленя В.Д., Щерба Е.В.** Сравнительный анализ устойчивости комбайнов избирательного действия 71
- Басалай Г.А.** Повышение эффективности работы спаренного планетарно-дискового исполнительного органа проходческо-очистного комбайна 83

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Екименко А.Н.** Сравнительная эффективность модификации фенолформальдегидных смол эпоксидами и полиорганосилоксанами в матрицах древесных пластиков 93

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

Подписано в печать 10.03.2014 г.
Формат 60×84¹/₈. Бумага «Navigator», А4, 80 г/м². Заказ 985. Усл. печ. л. 17,68. Тираж 100 экз.
Отпечатано Минским областным унитарным предприятием «Слущкая укрупненная типография»
223610, Республика Беларусь, Минская область, г. Слуцк, ул. М. Богдановича, 7.
ЛП № 02330/0494181 от 03.04.2009 г.

MINE MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE-BUILDING

№ 1 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 I. Possibility of a large intensity technogeneous dynamic event as a result of a large-scale development of the mining area..... 5
- Puzanov D.A., Mozgovenko M.S., Gubanov V.A.** The results of stability research of openings at their driving in the sylvinitic layer IV worked by the lower lava in the mine 3 PU's of JSC «Belaruskali»..... 25
- Zlotnikov I.I., Khilo P.A., Prushak V.Ja., Akhmadieva L.V., Shapovalov V.M.** Analysis of peculiarities of molecular interaction at destruction of rocks with the usage of process liquids 34
- Gubanov V.A., Puzanov D.A., Mozgovenko M.S., Mikheev I.A.** Choice of points of emplacement of development workings at their driving in protective intercolumn pillars in 25-30 years after carrying out the winning operations in lavas worked-out contiguously..... 43
- Berezovski N.I., Boriseiko V.V.** Innovation energy- and resource saving technologies of peat briquettes production..... 48
- Polyakov A.L., Misnikov V.A., Lutovich E.A., Shafikov M.G., Jakubovich N.N.** Roof bolting of the first level of support applicable to the powered installation. Laboratory tests of its individual units and elements..... 56

MACHINE-BUILDING

- Lustenkov M.E.** Choice substantiation of mechanical transmissions working in the holes..... 64
- Kuchik A.S., Mikhalenya V.D., Shcherba Ye.V.** The comparative analysis of stability of selective action roadheaders 71
- Basalay G.A.** Effectiveness increase of operation of the pared planetary-disk cutting device of the mining-and-roadheading machine..... 83

MATERIALS ENGINEERING

- Ekimenko A.N.** Comparative efficiency of phenolformaldehyde pitches modification by epoxides and polyorganosiloxanes in wood plastics matrixes 93
-
-

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 550.348; 622; 539.3

**ТЕХНОГЕННЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ В РЕГИОНАХ
КРУПНОМАСШТАБНОГО ОСВОЕНИЯ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА****Часть 1. Возможно ли техногенное динамическое событие большой интенсивности как следствие крупномасштабного освоения подземного пространства?**

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

Статья является первой частью из серии, посвященной рассмотрению различных аспектов общей комплексной задачи моделирования, прогнозирования и изучения таких классов динамических процессов как техногенные землетрясения, динамические срывы, наведенные динамические явления, проявляющихся в массивах горных пород вследствие ведения крупномасштабных подземных горных работ. В данной работе рассмотрены общие вопросы, касающиеся такого явления, как наведенные динамические явления (техногенные землетрясения), как следствие ведения подземных горных работ.

Введение

В настоящее время представляется уже доказанным факт, что крупномасштабная и интенсивная разработка месторождений полезных ископаемых приводит к активизации опасных сейсмических и деформационных процессов в районах размещения предприятий горнодобывающей промышленности. При этом важность проблемы прогноза и предотвращения горных ударов и техногенной сейсмичности с годами не снижается, а только возрастает.

Следует отметить, что хотя возможность инициирования сейсмических событий различной интенсивности в результате крупномасштабного освоения подземного пространства сегодня уже можно рассматривать как доказанный факт, но нельзя утверждать, что, например, разработка месторождений полезных ископаемых обязательно обуславливает массовое повышение сейсмической активности и приводит к техногенным землетрясениям.

Анализ причин, установление механизмов и построение моделей влияния горных работ на сейсмичность и деформационные процессы являются актуальной задачей, причем острота этой проблемы возрастает с увеличением масштабов ведения горных работ, с осложнением горно-геологических условий и глубин разрабатываемых залежей полезных ископаемых.

Данные обстоятельства предполагают необходимость и значимость серьезного изучения территории Беларуси, особенно в районе крупномасштабного освоения подземного пространства, на предмет возможности проявления техногенных динамических явлений различной интенсивности и масштабов.

1 О понятии «техногенное землетрясение»

Понятие «техногенные (возбужденные, наведенные) землетрясения» широко используется в настоящее время, в частности, в сейсмологии, геофизике.

Можно привести большое количество примеров, когда на относительно небольших территориях в результате инженерно-технической деятельности человека формируются достаточно высокие техногенные нагрузки. К ним относятся регионы интенсивной добычи полезного ископаемого, современные мегаполисы с развитой инфраструктурой наземного, приповерхностного и подземного строительства, крупные подземные инженерные сооружения, искусственные водохранилища и т.д.

Определение «техногенные землетрясения» было введено в первую очередь с такими процессами, как заполнение масштабных резервуаров, водохранилищ, отработка крупных нефтяных и газовых месторождений [1, 2].

Подобные возбужденные техногенные землетрясения бывают весьма сильными с магнитудой $M \sim 6$ и вызывают трагические последствия. На территории бывшего СССР подобные явления (увеличение сейсмичности в десятки раз) наблюдались, например, при заполнении водохранилищ на Нурекской, Токтогульской, Чарвакской, Ингури, Чиркейской, Зейской и других ГЭС. Причем на отдельных гидроэлектростанциях установлена прямая связь увеличения сейсмичности с повышением уровня воды в водохранилище.

Наведенная сейсмичность, связанная с отработкой нефтяных и газовых месторождений, отмечена была, например, в США (месторождения Рейнджли и Деневер), в Узбекистане (Газлийские землетрясения 1976 и 1984 года), в Дагестане (Старогрозненское 1971 г., Октябрьское 1973 г.), в Татарстане и других странах.

Аналогичные наведенные сейсмические явления могут иметь место и при ведении крупномасштабных горных работ как при отработке рудных, так и пластовых месторождений. При этом, речь идет именно о горно-тектонических ударах и техногенных землетрясениях, обусловленных ведением горных работ.

Горно-добычная деятельность может быть причиной сейсмических явлений от незначительных микросотрясений до толчков значительных величин. Горно-тектонические удары и техногенные (возбужденные, наведенные) землетрясения представляют собой наиболее сильные проявления горного давления при подземной отработке месторождений полезных ископаемых. Основная разница между этими явлениями состоит в том [3], что очаги горно-тектонических ударов расположены непосредственно в горных выработках, а очаги техногенных землетрясений – в массиве за пределами выработок. Поэтому горно-тектонические удары вызывают в конкретных выработках значительно большие разрушения, чем техногенные землетрясения. В то же время, как указывается, например, в [4], последние происходят гораздо чаще. Такие события связаны с высоким уровнем региональных напряжений и реализацией подвижек по тектоническим нарушениям различного ранга вследствие ведения горных работ.

Так, наиболее сильные катастрофические динамические явления в горной практике отмечены 21 января 1960 года на руднике Коулбрук (Coalbrook) в ЮАР, где были разрушения на площади около $3,2 \text{ км}^2$ и погибли 437 подземных рабочих; 13 марта 1989 года на соляном руднике Вера (Werra) в Германии, где разрушения были на площади около 6 км^2 ; 21 января на угольной шахте Бук Клифс (Book Cliffs) в США, где было разрушено 15 тыс. м^2 целиков; 3 февраля 1995 года на руднике Солвей (Solvay) в США разрушения произошли на площади около 2 км^2 . Горные удары и техногенные землетрясения стали реальностью при отработке рудных месторождений в России: на Кировском руднике ПО «Апатит» в Хибинах ($M \sim 4,2-4,3$ от 16.04.1989 г., $M \sim 3,0$ от 25.07.1989 г.), на Североуральских и Южноуральских бокситовых рудниках ($M \sim 3,0$ от

5.10.1984 г., $M \sim 3,5-4,0$ от 28.05.1990 г.), на железорудном Таштагольском месторождении в Горной Шории ($M \sim 3,0-3,5$ от 12.08.1984 г.). В 1995 году 5 января на II Соликамском руднике в России произошло внезапное разрушение междукамерных целиков и междупластовых потолочин на площади ≈ 300 тыс. м², повлекшее за собой практически мгновенное оседание земной поверхности до 4,5 м. Активная горнодобывающая деятельность на территории Чехословакии, в частности, в районе угольного бассейна в Острава-Карвине (ОКУБ), явилась причиной сейсмических явлений в данном регионе. Многочисленные примеры техногенных наведенных динамических явлений (горно-тектонические удары, техногенные землетрясения), проявление которых представляло собой последствия активного освоения подземного пространства, приведены в работах [1-19]. В работе [4] выполнен анализ энергетических показателей наиболее мощных по выделенной энергии сейсмических событий, произошедших на российских рудниках, и приведены данные о сильнейших горно-тектонических ударах и техногенных землетрясениях на рудниках России в одинаковых сейсмологических показателях.

Очевидно, что весьма опасными представляются ситуации наличия резервуаров больших размеров (например, шламохранилищ) и искусственных насыпей значительной техногенной нагрузки (например, отвалы) в горнодобывающих регионах с большими площадями отработки. Вероятность возникновения наведенной сейсмичности в этом случае значительно возрастает.

Количество техногенных сейсмических событий на горнодобывающих объектах в различных странах в настоящее время сохраняется на достаточно высоком уровне. Важно отметить, что техногенные сейсмические события (горно-тектонические удары и техногенные землетрясения) фиксируются на самых различных месторождениях, и подавляющая часть событий произошла в течение последних нескольких десятилетий. Из анализа случаев проявления крупных горно-тектонических ударов следует, что такие явления проявляются на месторождениях, где выявлены аномально высокие горизонтальные напряжения вне зависимости от типа тектонической структуры (стабильные щиты, подвижные платформы, мобильные горно-складчатые области). Техногенные же землетрясения проявляются, как правило, на месторождениях, где извлекаются и перемещаются большие объемы горной массы. По данным, опубликованным в литературных источниках [9, 11], *геодинамический режим региона нарушается лишь при извлечении определенного объема горной массы и наступает аналогия наведенной сейсмичности при заполнении водохранилищ*. В работах [20, 21] показано, что в случае отработки породных слоев очистными выработками степень реализации сейсмического момента пропорциональна объемам обрушившихся пород в лаве за забоем.

Следовательно, можно утверждать, что *техногенные сейсмические события определяются масштабами отработанного пространства*.

В настоящее время установлено, что *техногенная сейсмичность является отражением эволюции напряженно-деформированного состояния (НДС) геологической среды в природно-технических системах, в то время как сейсмичность природная (тектоническая) является отражением эволюционных процессов в литосфере* [2, 22].

В большинстве случаев наведенная сейсмичность физически практически неразличима от естественной [21]: такие явления имеют подобный механизм проявления – тот же радиоактивный спектр и такую же картину падения напряжений.

Результатом анализа и обобщения случаев естественной и наведенной сейсмичности может быть вывод о том, что большая часть литосферы Земли должна быть «напряжена», чтобы существовала возможность «сдерживания» и «недопущения» реализации движений / подвижек в любое время по нарушениям (макротрещинам, разломам и т.д.) даже в регионах, где нет активных тектонических деформаций [2]. С этой точки

зрения организация системных наблюдений и изучение регионов со значительными техногенными нагрузками на породный массив, которые не привели к наведенной сейсмичности, представляется актуальным и важным. Вследствие того, что большая часть литосферы «напряжена», она находится в состоянии «критической самоорганизации» [2]. Релаксация напряжений может происходить падением напряжений в результате землетрясений различной интенсивности, что аккумулирует деформации в очень широком диапазоне вариации. Вследствие этого техногенная деятельность (заполнение резервуаров, возведение насыпей, горные работы) может индуцировать движения породной толщи.

Приведенные обстоятельства предполагают необходимость и значимость дальнейшего изучения территории Беларуси в районах крупномасштабного освоения как подземного пространства, так и крупных наземных и приповерхностных инженерных сооружений и объектов. Наиболее сложная сейсмическая обстановка наблюдается в регионах с нарушенной геологической средой. В качестве примера можно привести Солигорский промышленный район, территория которого до 1978 года считалась асейсмичной, но происшедшие в 1978, 1983 и 1988 годах землетрясения (силой до четырех баллов по шкале Рихтера) принципиально изменили первоначальную оценку.

Наряду с выявленными сейсмическими явлениями, энергетический класс которых определяется современной мобильностью земной коры, обнаружены местные сейсмические явления (до тридцати в год), вызванные, вероятно, техногенной деятельностью (подработка месторождения, сосредоточение на поверхности огромных объемов твердых и жидких солей и шламохранилищ), оказывающих существенное влияние на изменение геодинамического режима.

Комплексные исследования для региона разработки Старобинского месторождения (НПО «Космоаэрогеология», Центр геофизического мониторинга НАН Беларуси, БГУ) показали совпадение относительно высокобалльных землетрясений и локальных сейсмических явлений с зонами повышенной активности новейших тектонических движений, что позволяет сделать предположение об их тесной генетической связи, т.е. активные движения земной коры, ее ландшафт и местные землетрясения связаны между собой. В связи с отражением на космических снимках большого количества линейментов, различных по значимости и интенсивности, возможно получение дополнительных сведений об особенностях структурно-неотектонического плана района и связанных с ним проявлений местной сейсмичности. Реагируя на новейшие тектонические движения, землетрясения способствуют обновлению старой системы трещиноватости и образованию новой, часто выраженной в рельефе. При этом, в результате совместного действия эндогенных факторов и подработок калийных горизонтов, новые системы трещин подчиняются общим тектоническим закономерностям региона.

В связи с тем, что Беларусь находится в пределах Восточно-Европейской платформы, по статистическим данным землетрясения не должны превышать пяти баллов по шкале Рихтера. Тектоническая и неотектоническая обстановка Солигорского промрайона, а также результаты аэрокосмогеологических исследований позволяют сделать выводы о том, что максимальная бальность землетрясений может быть отмечена в приразломных зонах Центрального, Стоходско-Могилевского разломов и Южной тектонической зоны. Особенного внимания требуют узлы пересечения названных зон разломов. У границ блоков в непосредственной близости от тектонически-активных разломов наблюдается наибольшая концентрация напряжений. По мере удаления от тектонических нарушений величины напряжений снижаются. Максимальные главные напряжения действуют, как правило, вкрест простирания основных складчатых и разрыв-

ных структур. На переклиналильном замыкании складок происходит переориентация главных напряжений.

Вместе с тем, деформационные процессы в районах краевых зон блоковых структур необходимо рассматривать не только с точки зрения изменения геолого-геоморфологических условий, но и учитывать изменения гравитационного поля Земли, например, вследствие лунно-солнечных приливных явлений, поступательного и вращательного движения Земли и Луны, прецессионного качания и т.д.

Анализ многих случаев наведенной сейсмичности показывает, что такие ситуации могут быть разделены на две категории в зависимости от отклика породной толщи [2, 23]. Во многих случаях имеет место непосредственный отклик, когда наблюдается увеличение наведенной сейсмичности сразу же после техногенной аварии/деятельности. В других случаях наблюдается «задержанный отклик», когда основная наведенная сейсмическая активность не происходит в течение длительного времени (даже нескольких лет) после техногенной аварии/деятельности. Наличие различных типов откликов позволяет ввести несколько механизмов происхождения техногенных землетрясений.

Ярким примером непосредственного отклика на техногенную деятельность могут быть события на Нурекском водохранилище в Таджикистане [24]. Мониторинг в регионе водохранилища был организован до заполнения водохранилища, и существенное усиление сейсмичности наблюдалось сразу же после первого заполнения резервуара до 100-метрового уровня. Активность затем закончилась и даже упала до незначительного уровня со слабыми флуктуациями до второй стадии заполнения до 200 метров, когда произошел очень значительный взрыв активности.

В случае откликов, происходящих непосредственно за техногенной аварией/деятельностью, имеет место, главным образом, множество малых землетрясений, локализованных на небольших глубинах в непосредственной близости от источника события. В случае же задержанного отклика наблюдаются землетрясения значительных величин, начинающихся на больших глубинах и зарождающихся на значительных расстояниях от источника (даже до десятков километров).

Итак, анализ причин, установление механизмов и построение моделей влияния горных работ на сейсмичность и деформационные процессы являются актуальной современной проблемой, причем острота этой проблемы возрастает с увеличением масштабов ведения горных работ, с осложнением горно-геологических условий и увеличением глубин разрабатываемых залежей полезных ископаемых.

2 Возможно ли искусственное наведенное землетрясение?

По словам члена-корреспондента РАН, председателя российского экспертного совета по прогнозу землетрясений Алексея Николаева (газета «Советская Беларусь» от 27 февраля 2010 г.), еще в 1970-е годы советским военным удалось спровоцировать 7-балльное землетрясение на Памире.

Важным моментом представляется то, что землетрясения, как механическое явление, теоретически могут быть вызваны, например, в результате мощного подземного взрыва.

Так как искусственное землетрясение по своим внешним проявлениям ничем не отличается от естественного, то на первый взгляд кажется, что практически невозможно установить природу происхождения динамического явления. Один из возможных вариантов – посмотреть, например, места ядерных испытаний и узнать, не было ли в это время где-нибудь поблизости землетрясения. Например, испытание ядерной бомбы в Неваде в декабре 1968 г. совпало с 5-балльным землетрясением в том же штате (это

привело к заключению, что эту дату можно считать датой рождения тектонической бомбы). Перечень странных совпадений можно продолжить. Так, сильнейшее землетрясение 1998 года в Мексике произошло спустя неделю после французского ядерного испытания на атолле Муруроа.

Вместе с тем, мощность термоядерной бомбы, взорванной на Новой Земле в 1961 году, в тротиловом эквиваленте превысила 50 миллионов тонн. Это больше, чем все взрывные устройства, использованные во Второй мировой войне, в том числе ядерные бомбы, сброшенные на Хиросиму и Нагасаки. Ударная волна три раза обогнула земной шар, но этого мало, чтобы вызвать какие-то значительные разрушения.

Естественных колебаний земной коры, сопутствующих *одиночным взрывам* самых мощных устройств, совершенно недостаточно для значимых разрушений. Поэтому для возникновения наведенного землетрясения единственно возможным источником является способ усиления естественных процессов, например – движения литосферных плит, извержения вулканов и др. Так, значительное динамическое явление при ведении горных работ может быть триггером для техногенного землетрясения, которое «удачно» накладывается на естественный процесс.

Однако проведенные рядом исследователей опыты показали, что в некоторых сейсмоопасных районах Земли с помощью наземных или подземных ядерных взрывов относительно малой мощности можно инициировать землетрясения, которые в результате могут привести к катастрофическим последствиям. Так, при испытании КНДР ядерной бомбы 25 мая 2009 года произошло землетрясение магнитудой 4,7 (по данным Геологической службы США, (USGS)).

Как указывалось ранее, закачивание жидкости в водохранилища и шахты на низменных местах и неустойчивых грунтах так же может привести к серьезным землетрясениям. Так, заполнение водой водохранилища Кариба в Африке сделало этот район сейсмически активным. В Швейцарии на берегу озера Цуг в ночь на 5 июля 1887 года 150 тысяч кубических метров земли пришли в движение и разрушили десятки домов, погибло много людей. Его причиной считают проводившиеся тогда работы по забиванию свай на неустойчивых грунтах.

Теоретически вызвать значительные техногенные наведенные процессы возможно слабыми повторяющимися сейсмическими колебаниями. Для этого можно использовать, например, сейсмодвигатели. Данное устройство возбуждает волны, которые, отражаясь от породы, приносят с собой информацию о ее составе. Самый мощный в мире сейсмодвигатель «ЦВО-100» был построен в 1999 году на научном полигоне близ города Бабушкин, на Южном Байкале. Его разработкой занимались ученые Сибирского отделения Российской академии наук. Сейсмодвигатель представляет собой стотонное металлическое сооружение, которое, раскачиваясь, создает стабильный сейсмический сигнал. Однако, современные двигатели слишком маломощны, чтобы вызвать какие-либо значительные техногенные наведенные процессы.

Обобщение выполненных в 80-90-е годы XX века комплексных исследований коллективами сотрудников ИГД СО АН СССР и ИФЗ им. О.Ю. Шмидта АН СССР (спецсектор) по изучению особенностей механического «отклика» породных массивов на взрывы разной мощности позволило установить новое явление знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия [25, 26].

Сущность данного явления заключается в том [27], что при образовании полосей внутри массивов горных пород посредством мощных взрывов в их окрестности происходят смещения разных знаков между геоблоками с колебательным движением друг относительно друга, обусловленные стесненным поворотом и трансляционным

движением породных блоков разного иерархического уровня, зависящего от размеров образующихся полостей, горного давления и энергии взрывов.

Установление данного нового явления привело к формулировке новых задач, к выявлению новых фактов и закономерностей. Так, например, была выдвинута идея о существовании в массивах горных пород нелинейных упругих волн маятникового типа, носителями которых являются реальные структурные элементы (блоки) геологического вещества в приближении «абсолютно твердых тел» [28, 29].

Существенной особенностью знакопеременной реакции горных пород на мощные взрывные воздействия в породных массивах является их значительный радиус действия («дальнодействие») [27, 30]. В результате обработки натуральных экспериментов установлено, что процесс деформирования массивов горных пород имеет ярко выраженный неоднородный характер: *деформации локализуются на поверхностях и в областях ослабления массива, а структурные блоки движутся в значительной мере независимо*. При этом движение блоков имеет знакопеременный характер по трансляционным и вращательным компонентам. Получено, что локальные механические проявления необратимого характера от воздействия взрыва наблюдаются до расстояний $(8-10) \times R$, где R – радиус зоны взрывного разрушения породы. В работе [31] на основе анализа последствий технологических взрывов в массивах горных пород установлен эффект «дальнодействия»: фиксированные в натуральных замерах деформации массивов распространялись почти на порядок дальше, чем это следовало ожидать из решения классических задач о распространении зоны взрывного разрушения сплошной среды [32, 33].

Как отмечается в [27], обнаружение эффекта знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия явилось доказательством того, что большая доля энергии взрыва расходуется не только на дробление породного массива в очаговой зоне и ее непосредственной окрестности, а еще и передается в виде кинетической энергии структурным элементам напряженной геосреды. Первые систематизированные исследования, касающиеся описания данного явления, представлены в работах [25, 34].

На основании этого можно сделать предположение о том, что «раскачать» *блочно-иерархическую геосреду можно и волнами деформаций/напряжений и от другого источника, «не взрывного» происхождения*. Здесь термин «раскачать» подразумевает передачу кинетической энергии структурным элементам геосреды. В качестве такого источника могут выступать, например, динамические импульсы малой амплитуды и интенсивности, но определенной частоты. Это может быть и горный удар, малоамплитудные подвижки по разлому или динамический срыв значительной величины [35, 36].

Вместе с тем, современный уровень развития науки и технологий не позволяет разработать единой теории управления техногенными динамическими процессами как реакцией на активное освоение подземного пространства. Кроме того, время «наступления эффекта» может быть разным.

С другой стороны, следует отметить и такое важное обстоятельство, что искусственные динамические процессы могут иметь и «положительный эффект». Так, например, направленные *подземные взрывы могут снижать сейсмическую активность*. Данное направление исследований представляется весьма перспективным для разработки прикладных технологий. В перспективе можно, например, инициировать направленную волну деформаций, которая, двигаясь навстречу цунами, будет «гасить» их чувствительную энергию.

3 О движениях породных структур под воздействием природных и техногенных факторов

Подвижность породных массивов, обусловленная структурными нарушениями различных пространственных протяженностей, в результате действия внешних и внутренних факторов (местных и транзитных землетрясений, длиннопериодных деформационных процессов, лунных и солнечных приливов, техногенной деятельности и т.д.) является существенной особенностью их поведения. В предыдущих разделах показано, что достаточно большое количество событий и фактов, имеющих место в последние годы, свидетельствуют о том, что аномально высокий уровень техногенной нагрузки в сочетании с особенностями геологической среды может приводить к существенному изменению геодинамической обстановки в регионе. В результате реакции породного массива на техногенные воздействия возникают динамические события разной энергии: от шелушений стенок горных выработок до горно-тектонических ударов, сопровождающихся землетрясениями с магнитудой до 5.

Наличие естественной иерархической структуры в породной толще, обусловленной наличием поверхностей и зон геологических нарушений (тектонические разломы, трещины разного уровня и краевые зоны блоковых структур, линеаменты и т.д.), определяет сложные деформационные процессы, происходящие в массивах горных пород сложного блокового строения в результате как естественных геофизических процессов, так и в результате возмущений техногенного характера [35, 37].

В последнее время представления о современном геодинамическом состоянии недр претерпели существенные изменения. Многолетние исследования, выполненные на геодинамических полигонах, показали, что не только в регионах динамической активности и новейшей тектоники, но и на древних платформах наблюдаются деформационные процессы. Так, например, они могут проявляться в форме интенсивных квазипериодических вертикальных и горизонтальных подвижек по разломам с амплитудами до 20-40 и 40-50 мм/год соответственно.

Важной особенностью деформирования блочной среды является возможность квазинезависимого движения блоков при локализации деформаций вблизи структурных нарушений, что является причиной возникновения дифференциальных движений в блоковых структурах.

Увеличение объемов добычи полезных ископаемых, сооружение крупных наземных и подземных инженерных объектов, а также другие виды техногенного воздействия на геологическую среду существенно изменяют геомеханическую ситуацию в пределах региона и приводят к формированию сложной структуры полей напряжений.

Изменение НДС массива горных пород при ярко выраженной пространственной неоднородности, а так же нарушение хода релаксационных процессов (которые поддерживают состояние устойчивого динамического равновесия среды в естественных условиях) в результате внешних воздействий могут служить причиной потери механической устойчивости породного массива и размещенных в нем сооружений.

В соответствии с основными законами теории катастроф для инициирования процесса выделения накопленной в приконтурной зоне потенциальной энергии при определенных условиях достаточно незначительного внешнего воздействия [38].

Как правило, усиление и активизация геодинамической и сейсмической активности становятся значимыми при выработке более 40 % начальных запасов [39] и, в первую очередь, определяются изменением начального естественного напряженного состояния в породной толще. Не менее важным является и такой фактор, как наличие разрывных нарушений породного массива в зоне техногенного воздействия.

Экстремальное лавинообразное развитие процессов в массиве горных пород,

обусловленное совокупностью природных и техногенных факторов, можно трактовать как чрезвычайную ситуацию. Масштабы проявления таких явлений требуют выбора и учета большого количества факторов влияния. Так, например, релаксационные процессы, имеющие место в массиве, приводят к постепенному снижению риска возникновения опасных динамических явлений. Однако очевидно, что такой параметр риска возникновения опасных явлений как время существования потенциальной опасности его возникновения (или время уменьшения этого риска) неразрывно связан с пространственным масштабом зоны концентрации напряжений и, следовательно, с масштабами ожидаемых существенных деформационных процессов. Следовательно, если речь идет о прогнозировании горных ударов в выработках, при которых происходит разрушение только приконтурной зоны и выбросы отдельных блоков породы в выработку, 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 горнопроходческих работ). Если же говорить о прогнозе крупных горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений, охватывающих значительные области массива, то для этого следует анализировать более крупномасштабные факторы внешнего воздействия, приводящего к возникновению опасного напряженного состояния на крупных структурных элементах, и иметь в виду, что напряжения в этом случае будут существовать в течение длительного времени. Этот опасный временной период подлежит индивидуальной оценке в каждом конкретном случае.

Опасность возникновения чрезвычайных ситуаций особенно возрастает при освоении подземного пространства в зонах геодинамической активности.

Как указывалось ранее, к настоящему времени (в результате выполненных долгосрочных сейсмологических наблюдений) доказано, что *горнодобывающая деятельность оказывает серьезное влияние на индуцированную сейсмичность* (хотя данный факт не является решающим). Увеличение глубины и интенсивности горных работ, объемов добычи полезных ископаемых повышает техногенную нагрузку на геомеханическое пространство месторождения, вызывая перераспределение напряжений, и, как следствие, рост числа негативных проявлений горного давления в динамической форме. Серьезное влияние на индуцированные сейсмические события оказывают «естественные факторы» и технология разработки месторождения [16]. Среди «естественных факторов» особое значение имеют такие, как: высокий уровень тектонической напряженности массивов; структурно-блоковое строение массивов; условия залегания месторождения и конфигурация участков; высокие значения упруго-прочностных свойств пород. Вместе с тем, *иницирующее влияние на техногенные землетрясения имеют все же параметры горных работ.*

Известно, что в зонах наиболее активно нагружаемого массива инициируются медленные деформационно-волновые процессы, распространяющиеся затем на другие участки шахтных полей. Данный факт подтверждается, например, данными натурных наблюдений [14].

Одной из причин появления деформационно-волновых процессов может быть достижение ширины выработанного пространства предельного пролета кровли, установленного для данных условий. В этом случае налегающая толща над районом ведения горных работ начинает смещаться более активно, чем на других участках шахтного поля. При достижении ширины выработанного пространства, равной предельному пролету, в призабойном массиве формируются максимальные коэффициенты концентрации напряжений. Однако на основании накопленного опыта геомеханического сопро-

вождения горных работ можно утверждать, что с увеличением пролета отработки в направлении ведения горных работ коэффициенты концентрации опорных нагрузок снижаются. Поэтому следует ожидать снижения интенсивности сейсмопроявлений и стабилизации геомеханической обстановки.

В результате обработки и анализа данных каталога сейсмических событий Таштагольского рудника [40] и визуализации распределения эпицентров очагов событий с учетом их энергетического класса выявлено, что с увеличением выработанного пространства растет число событий техногенной сейсмичности и их суммарная энергия, а также область распространения: очагами «охватывается» все большая площадь. Ежегодный прирост числа событий на месторождении происходит за счет повышения количества мелких сейсмических событий (1-3 энергетического класса), в то время как число событий 4-9 классов остается практически неизменным. В целом характер распределения динамических проявлений горного давления во времени и пространстве отражает изменение положения фронта очистных работ по месторождению и увеличение интенсивности работ на нижних горизонтах [21].

Проявления деформационно-волновых процессов в массиве имеют кластерный характер, причем подчиняются определенным закономерностям. Имеющееся в какой-то области массива возмущение может инициировать «короткие» и «длинные» звенья распространения волновых событий: когда инициируемая в каком-то районе волна достигает различных областей массива. Другими словами, с увеличением энергии возмущающего сейсмособытия растут как дальность распространения, так и энергия индуцированных им волновых процессов.

Следующей причиной, обуславливающей сейсмособытия, которые, в свою очередь, вызывают деформационно-волновые движения, являются слабые подвижки по контактам геологических блоков с последующим нарушением их сцепления.

В качестве еще одной из причин увеличения сейсмоактивности могут быть процессы, имеющие аналогию с нагружением образцов горных пород. В случае «мягкого» режима нагружения образцов прессом, в том числе и на стадии запредельного деформирования, довольно часто возникают ситуации, когда образец начинает «сопротивляться» сжатию в большей мере, чем в предшествующий период. При этом давление в нагружающей системе растет, а деформация между плитами прессы замедляется. В результате очередного микроразрушения образец, при сохранении целостности, способен «уходить» из-под нагрузки, с сопутствующим достаточно резким сбросом давления в гидравлической системе и скачкообразным сближением плит прессы, подвижки которых носят как бы «пассивный» характер и устремляются за «ушедшим» из-под нагрузки образцом [14]. Подобный процесс может проявиться и в массиве горных пород. «Уход» из-под нагрузки массива приводит не только к активизации смещений залегающих над ним пород, но и обуславливает активизацию процесса упругого «восстановления» пород в другой части породного массива, что сопровождается возрастанием сейсмоактивности в толще пород. При этом сейсмопроявления могут распространяться не во все стороны от источника возмущения. «Уход» из-под нагрузки, например, может произойти в результате разрушения пород в наиболее ослабленной части массива (например, в области наличия разгрузочных скважин) со «снятием» вертикальных нагрузок. Если же в области массива наиболее слабыми элементами являются контакты структурных блоков, ограниченных субвертикальными трещинами, то реализация здесь предельных состояний возможна при нарушении сцепления по контактам блоков с раскрытием трещин в горизонтальном направлении. При этом «снятия» вертикальных нагрузок не происходит, и, соответственно, породы не имеют достаточной степени свободы для реализации деформаций упругого «восстановления». Вместе с тем, энергия

сейсмособытий, обусловленных периодическим «уходом» массива из-под нагрузки, со временем снижается, поскольку структурные блоки приобретают все большую подвижность. На срыв сцепления по их контактам будет требоваться все меньшие усилия. Следовательно, на первое место со временем выдвигается проблема устойчивости, а не удароопасности разрабатываемого массива.

Как указывалось, мощные динамические техногенные явления обычно группируются в окрестности фронтов очистных работ, т.е. на участках повышенных напряжений. По времени они приурочены в основном к крупномасштабным процессам, сопровождающим горные работы (например, взрывы большой интенсивности, массовые обрушения), которые играют роль «спускового крючка» [41, 42]. Но, очевидно, что не каждый такой процесс приводит к динамическому техногенному явлению. Накопление потенциальной энергии в массиве за счет техногенных процессов часто нейтрализуется серией сдвигов по тектоническим нарушениям и трещинам, последствия большей части которых регистрируются как сейсмособытия. Распределение таких сейсмособытий в период технологических процессов типа взрывов, обрушений и др. помогает выявить энергонасыщенные участки, которые массив не способен нейтрализовать на этой стадии и которые могут самореализоваться, например, в виде горного удара на стадии массовых взрывов [42]. Если предположить, что вся потенциальная энергия структурного блока перешла в сейсмическую энергию динамического явления, то можно оценить минимальный объем этого блока. Можно воспользоваться оценкой предельной упругой деформации сдвига земной коры ε [42]. По [43] величина предельной упругой деформации сдвига земной коры ε составляет $(1 \div 2) \times 10^{-4}$. В случае, когда поле деформации представлено единственной компонентой сдвига ε , объемная плотность внутренней энергии массива $W = G \varepsilon^2 / 2$, где G – средний модуль сдвига пород.

Важным представляется такой факт, что *деформационно-волновые процессы могут проявляться на значительном удалении от мест производства горных работ и профилактических мероприятий, а так же над закладочным массивом* [2, 14]. Причиной тому могут быть «глобальные» геомеханические процессы, происходящие в масштабе шахтных полей [14].

Долгосрочные наблюдения на основе геофизического и геомеханического мониторингов свидетельствуют о том, что частота сейсмических явлений представляет ответную реакцию массива на интенсивную эксплуатацию месторождений. Причиной землетрясений в большинстве своем является то, что горные работы выводят из состояния геодинамического равновесия сложившуюся в массиве систему геолого-структурных блоков различных рангов. Развитие сейсмического режима является следствием процесса аккумуляции и освобождения упругой энергии, накопленной массивом. Вследствие горных или горно-тектонических ударов система переходит в новое состояние равновесия. Если массивы рассматриваемого региона имеют сложную структуру и разбиты сериями радиальных и кольцевых разломов, то процессы восстановления геодинамического равновесия в рассматриваемом регионе имеют сложный многоступенчатый характер. Последний факт отражается в сейсмическом режиме региона [44].

В процессе уточнения ареала центров сейсмособытий на основе данных длительного сейсмологического мониторинга выявлены определенные закономерности. Так, расположение очагов сейсмособытий, как правило, связано с особенностями месторождения (например, влияние целиков, тектонические складки, раскройка шахтного поля и др.). В случае отработки продуктивных слоев лавами повышенное выделение сейсмической энергии с началом выемки лавы наблюдается через определенный временной интервал (в большинстве своем несколько недель). Его обычно относят ко времени формирования первой посадки кровли, которая изменяет характер энерговыделе-

ния. После отработки лавы интенсивность выделения сейсмической энергии значительно уменьшается и затем почти исчезает.

Прерывание горных работ на несколько суток (в примере 10 сут.) практически не оказывает влияния на графики Бениоффа (график зависимости суммы квадратных корней из энергии единичных событий от времени $\sum \sqrt{E} = (t)$). Следовательно, высвобождение упругой энергии, накопленной в массиве в случае временного прекращения горных работ, происходит с запаздыванием (носит инерционный характер).

Выполненные многочисленные исследования несколькими коллективами [44] показывают, что *между участками концентрации напряжений в массиве с очагами горно-тектонических ударов имеется четкая взаимосвязь*. Горно-тектонические удары приурочены к участкам концентрации напряжений в массиве вблизи тектонических нарушений. Следовательно, *потенциальными очагами горно-тектонических ударов являются места концентрации напряжений вблизи тектонических нарушений*. Горно-тектонические удары, возникающие вследствие пересечения или подхода горных работ к местам концентрации напряжений вблизи тектонических нарушений, относятся к первому типу [44].

Однако существуют горно-тектонические удары (ГТУ) второго типа. Механизм ГТУ второго типа существенно отличается от ГТУ первого типа. Механизм ГТУ второго типа обусловлен подработкой на большой площади геолого-структурных блоков значительных размеров. Вследствие этого блок разрушается на части с образованием зон трещин сдвига, которые возникают в области наибольшего ослабления массива горными работами. Наиболее «удобные» условия проявления ГТУ второго типа при отработке нескольких слоев сближенных горизонтов в массиве. Роль горных работ в ударах второго типа более существенна. В этом случае горные работы подрабатывают геолого-структурный блок, создавая условия для его разрушения, а так же определяют местоположение трещин разрушения как участков концентрации напряжений вокруг выработок двух (или более) вынимаемых слоев.

Установлено, что на шахтную сейсмичность оказывают влияние технологические взрывы, производимые при разработке месторождений полезных ископаемых [1]. Вместе с тем, ряд исследователей обращает внимание на то, что *на поздних этапах разработки месторождений значительная часть горных ударов (до 50 %) возникает вне временной связи со взрывами и не только вблизи горных выработок, но и на значительном удалении от них* [6].

Так, например, в работе [12] отмечено, что первые мощные удары на руднике «Умбозеро» произошли 3 и 9 ноября 1991 г. на фоне производственного затишья. Изучение причин техногенного землетрясения в районе рудника «Умбозеро» (17.08.99) показало [11, 12], что его образование было обусловлено высоким уровнем напряжений и геологической структурой региона, предыдущими горными ударами, в результате чего произошло перераспределение напряжений: их усиление в наиболее слабом элементе структуры привело к разрушению.

В результате анализа связи шахтной сейсмичности с проведением взрывных работ на Североуральских рудниках [1] выявлено наличие *статистически значимой корреляции между слабыми сейсмическими событиями (энергетический класс от 2 до 4) и взрывами, и статистически значимую независимость более сильных сейсмических событий от проведения взрывных работ*.

Таким образом, влияние взрывных работ, проводимых при разработке месторождения полезных ископаемых, на шахтную сейсмичность определяется целым рядом факторов и проявляется различным образом на различных рудниках. При изучении этой проблемы возможно использование двух подходов. Один из них заключается в

анализе последствий отдельно взятых взрывов, другой – в анализе изменения интегральных статистически значимых характеристик сейсмического режима после проведения серии взрывных работ. Оба подхода дополняют друг друга и в итоге позволяют получить статистически обоснованную физическую модель взрывов на шахтную сейсмичность.

Для анализа технологических взрывов, динамических ударов на шахтную сейсмичность вследствие малого количества сейсмических событий, происходящих непосредственно после каждого отдельно взятого взрыва, эффективным является использование получившего в сейсмологии распространение метода построения кумулятивных каталогов (метода накопления данных) [13]. Данный метод позволяет применить статистические методы анализа данных. Суть метода накопления данных заключается в следующем: для каждого взрыва создается выборка из сведений сейсмического каталога заданной по времени длительности, для каждой выборки время и положение гипоцентров сейсмических событий пересчитывается относительно момента и положения взрыва, в дальнейшем расчеты характеристик сейсмичности до и после взрывов выполняются для «интегрального» каталога.

В качестве характеристик сейсмического режима рассматриваются параметры закона повторяемости землетрясений, изменение сейсмической активности (суммы кубических корней из энергии землетрясений за определенный период времени), пространственное расположение эпицентров событий, их группируемость в пространстве и времени.

Известно [8], что соотношение между количеством землетрясений N различной энергии и энергетическим классом событий описывается линейной связью вида:

$$\lg N = \alpha - \gamma K, \quad (1)$$

где α – параметр, который включает количество сейсмических событий с некоторой заданной энергией;

γ – параметр, который представляет наклон графика повторяемости и характеризует состояние между количеством сильных и слабых землетрясений;

$K = \lg E$ – энергетический класс;

E – энергия землетрясения, Дж.

Изменение сейсмического режима, связанное с инженерной деятельностью человека, приводит к возрастанию коэффициента γ [1]. Рост величины α при постоянстве наклона графика повторяемости говорит об увеличении сейсмической активности рассматриваемого района.

В [1] показано, что для техногенной сейсмичности распределение времени между последовательными событиями может быть описано с помощью распределения Вейбулла:

$$P = 1 - e^{-(x/\lambda)^k}. \quad (2)$$

В качестве примера можно привести результаты анализа сейсмической активности в районе Таштагольского месторождения в сопоставлении с параметрами взрывных работ [45]. По результатам обработки данных натуральных наблюдений техногенной сейсмичности в районе Таштагольского месторождения получено, что сейсмический процесс в регионе может рассматриваться скорее как марковский, а не пуассоновский, поскольку сейсмическая активность в данный момент зависит от активности в предшествующие моменты времени. Установлено следующее.

1. Зависимость логарифма количества событий от величины их энергетического класса следует закону Гуттенберга-Рихтера с коэффициентом наклона от -0,4 до -0,54,

что значительно превышает значение коэффициента наклона графика повторяемости для естественной сейсмичности в рассматриваемом регионе (-0,32).

2. Средняя энергия сейсмособытий в районе проведения взрыва возрастает в 20-40 раз после проведения взрыва. Наибольшее количество сейсмособытий и выделение суммарной сейсмической энергии приходится на первый час после взрыва.

3. Линейный регрессионный анализ влияния энергии взрывов на количество и энергию событий в течение недели после взрывов показал, что между ними существует статистически значимая связь (на уровне 99 %) с коэффициентом корреляции 0,6-0,7.

4. Выявлено, что после взрывов наблюдается концентрация сейсмических событий в месте проведения взрыва. В течение последующих трех дней среднее расстояние между эпицентрами событий и местоположением взрыва постепенно возрастает и выходит на основные значения.

4 Иницирование сейсмических/динамических явлений возмущениями малой интенсивности. Эффект усиления волн разрушения в массивах горных пород

В настоящее время значительное внимание уделяется вопросам изучения влияния малых динамических возмущений на поведение статически напряженной блочной среды при разных условиях и видах нагружений. Это обусловлено тем фактом, что такие «малые» воздействия на породный массив могут привести к катастрофическим последствиям. Подтверждением этому могут быть примеры как в реальных условиях разработки месторождений полезных ископаемых, так и модельные и лабораторные примеры. Так, например, при проведении натуральных и лабораторных опытов обнаружен эффект, при котором одиночный сейсмоимпульс на диаграмме релаксации может вызывать скачкообразное возрастание напряжений с амплитудой, зависящей от интенсивности сейсмоисточника и его ориентации [46].

Выполненный анализ [47] целого ряда крупнейших техногенных аварий и катастроф свидетельствует о реальной возможности развития сценария, когда землетрясения с относительно невысокими магнитудами (2,0-3,0) создают на малых удалениях от очага аномально высокие амплитуды ускорений грунта (более 300 см/с²), обусловленные локальными резонансными взаимодействиями.

Искусственным возбуждением динамики горного давления импульсами ограниченной мощности необходимого уровня можно добиться использования сил горного давления для управления состоянием породного массива. Преимущества таких механических возмущений в направленном изменении состояния и свойств массива очевидны, так как они малоэнергоёмки, просты в управлении. Такое направление реализуется, например, в практике ведения горных работ в способах виброобработки массива.

По мнению академика С.В. Гольдина, «... интерес к медленным движениям (волнам) в блочных структурах вообще и в земной коре в частности в ближайшее время будет неизменно возрастать. Практически все движения этого типа имеют ярко выраженный нелинейный характер». Это мнение перекликается с высказыванием члена-корреспондента РАН А.В. Николаева о том, что в центре внимания геофизиков XXI века будут сложные нелинейные процессы, происходящие в земной коре и в более глубоких частях нашей планеты. Отмеченные выводы основываются на исследованиях последних десятилетий минувшего века ряда ведущих специалистов в области геомеханики и геофизики М.А. Губермана, М.В. Невского, В.В. Жадина, В.В. Адушкина, В.В. Ружича, Дж. Райса, В.Н. Николаевского, Б.И. Биргера, М.А. Садовского, В.Н. Родионова, В.Ф. Писаренко, В.Н. Опарина, А.Ф. Ревуженко, Н.И. Геза, С.В. Гольдина, С.Г. Псахова, Н.Г. Дядькова, А.В. Николаева и др. Внимание естествоиспытателей к медленным движениям в блочных геосредах неслучайно, так как с ними связаны важ-

ные энергообменные процессы горных пород разного иерархического уровня: «энергоемкие» процессы, происходящие при формировании очаговых зон будущих катастрофических событий (землетрясения, горные ударно-геомеханические процессы, сопровождающие горнодобывающие работы при освоении месторождений полезных ископаемых, особенно на больших глубинах (зоны сдвижения массивов пород). Установление кинематических связей между медленными движениями структурных элементов в напряженных геосредах и сопутствующие им «мигрирующие» сейсмоэмиссионные процессы представляют принципиальный интерес.

Такая постановка проблемы следует также и из геомеханического открытия волн маятникового типа [28], возникающих в напряженных массивах горных пород за счет колебательного вращательного движения геоблоков разного иерархического уровня как «абсолютно» твердых тел при импульсных воздействиях от взрывов, горных ударов или землетрясений. По существу наблюдается своеобразный «эффект домино» в блочно-сформированных геосредах. Есть основания ожидать, что именно волны маятникового типа в значительной мере отвечают за наиболее разрушительные процессы от землетрясений на разных удалениях от их очаговых зон. Как показано в работах ИГД СО РАН [27-29, 48, 49], скоростной диапазон этих групп волн, в зависимости от размеров геоблоков-носителей μ -волн и скорости относительных смещений между этими геоблоками, может быть чрезвычайно широким. От крупномасштабных технологических взрывов самая высокоскоростная группа волн маятникового типа может достигать величины 300-600 м/с, а низкоскоростная – величин единиц м/с и менее. Это намного ниже скорости распространения продольных волн в породных массивах. Следовательно, появляется реальная возможность заблаговременного оповещения о надвигающемся «последствии» землетрясения.

Вместе с тем, существует ряд вопросов, связанных с изучением особенностей распространения μ -волн от землетрясений в структурно неоднородных средах и, в первую очередь, с их напряженно-деформированным состоянием. В этом аспекте исследование зависимостей динамико-кинематических μ -волн, распространяющихся в блочных геосредах, от уровня напряженности последних в современных условиях является принципиально значимым. Такого уровня исследования должны быть комплексными: с использованием методов теоретического анализа, а также натуральных экспериментов и физического моделирования.

Интерес представляет эффект усиления волн на значительных расстояниях от источника их возбуждения. Эффект состоит в том, что в сильно напряженных прочных горных породах *скорость, приобретаемая частицами около выработок, нередко оказывается на порядок больше скорости частиц вблизи от источника сейсмической волны* [50-55]. Дуррхейм Р.Д. и Линьков А.М. объясняют эффект усиления волн «подкачкой» упругой энергии из напряженных пород. «Подкачка» возникает, когда волна падает на поверхности разрыва (макротрещины, геологические нарушения), находящиеся в состоянии разупрочнения [51-53]. Разупрочнение приводит к потенциальному росту амплитуд, регистрируемому как эффект усиления волны [51, 52].

Эффект усиления представляется исключительно важным для понимания того, как сравнительно слабые сейсмические возмущения могут вызвать опасные динамические явления – горные удары в шахтах и землетрясения в земной коре. С точки зрения теории устойчивости, эти динамические явления представляют предельный случай усиления, когда бесконечно малое возмущение приводит к значительным, нередко катастрофическим последствиям.

5 О регистрации техногенной (наведенной) сейсмичности

Значительное количество организаций занимаются проблемой организации мониторинга и интерпретации информации, получаемой от сейсмических волн – упругих колебаний, распространяющихся сквозь толщу Земли в результате землетрясений, катастроф, взрывов и др. Одной из важных задач является разработка методик, позволяющих различать сигналы от естественных землетрясений и от различных техногенных событий (горных ударов, взрывов и т.п.). Основные трудности связаны с большим числом и разнообразием землетрясений и других событий, генерирующих сейсмические сигналы. Самая совершенная система наблюдений не может избежать регистрации таких сигналов. Например, в международный итоговый отчет ежедневно попадают более 600 землетрясений: в ходе подземных работ в индустриально развитых странах производятся взрывы миллионов тонн взрывчатки. В целом ежедневно регистрируются около 25 сейсмических событий с магнитудой выше четырех, и это число возрастает на порядок при понижении магнитуды на единицу (например, с 25 до 250 событий в день при уменьшении магнитуды с четырех до трех) [56].

Неправильная идентификация события может привести к неправильным выводам. Так, катастрофа в шахте в юго-западном Вайоминге породила сейсмические «объемные» волны, распространяющиеся на большие расстояния. Эти волны были зарегистрированы сейсмографами на расстояниях до 4 тысяч километров от источника [56]. Анализ графического представления катастрофических техногенных событий в шахтах и землетрясений (зависимость магнитуды объемных волн от магнитуды поверхностных волн) убедительно демонстрирует, что точки, соответствующие взрывам, горным ударам, и точки, соответствующие землетрясениям, образуют два отдельных семейства. Однако событие на шахте в Вайоминге выглядело как мощный взрыв.

Важным представляется такой установленный сейсмологами факт [56], что *объемная волна от обрушения в шахте начинается с глубокого провала, в то время как при взрыве она начинается с острого пика*. В качестве примера на рисунке приведены записи двух событий. Обе записи были сделаны на станции College Station на Аляске [56]. Отрицательный начальный пик на сейсмограмме катастрофы соответствует обрушению породы внутрь горной выработки.

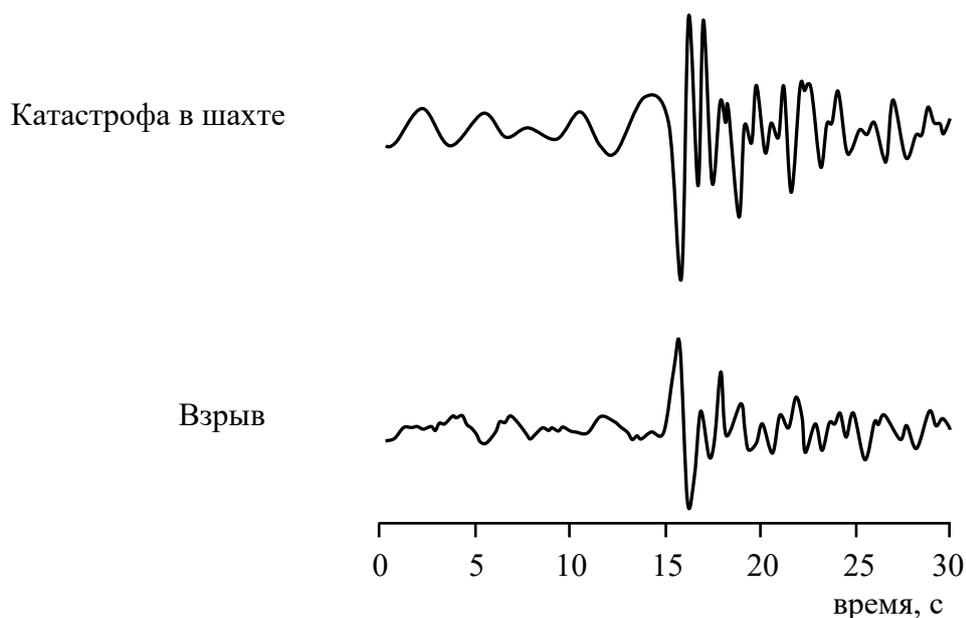


Рисунок – Записи динамических проявлений, сделанные на станции College Station на Аляске

Классические методы идентификации основаны на сравнении силы длинноволновых поверхностных (поперечных) колебаний 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.

Более тщательный анализ сейсмических колебаний, вызванных катастрофами в шахтах, показал, что они не могут быть связаны с взрывами: *при катастрофе грунт обрушивается внутрь полости, а не движется вверх, как при взрыве, и поэтому волна начинается с провала, а не с пика*. Этот эпизод оказался важным, так как продемонстрировал, что такие события можно отличить от подземных взрывов с высокой степенью надежности на основании исключительно сейсмических данных.

Выводы

На сегодня представляется уже доказанным факт, что крупномасштабная и интенсивная разработка месторождений полезных ископаемых может быть причиной активизации сейсмических явлений от незначительных микросотрясений до толчков и техногенных землетрясений значительных величин.

Количество техногенных сейсмических событий на горнодобывающих объектах в различных странах в настоящее время сохраняется на достаточно высоком уровне, при этом такие события фиксируются на самых различных месторождениях. Из анализа случаев проявления крупных горно-тектонических ударов следует, что такие явления проявляются на месторождениях, где выявлены аномально высокие горизонтальные напряжения, а техногенные землетрясения – как правило, на месторождениях, где извлекаются и перемещаются большие объемы горной массы.

Можно утверждать, что техногенные сейсмические события определяются масштабами отработанного пространства, существенные нарушения геодинамического режима региона имеют место лишь при извлечении определенного объема горной массы.

Список использованных источников

1. **Адушкин, В.В.** Техногенные процессы в земной коре (опасности и катастрофы) / В.В. Адушкин, С.Б. Турунтаев. – М.: ИНЭК, 2005.
2. **Scholz, C.H.** The mechanics of earthquakes and faulting / C.H. Scholz. – Cambridge University Press, 1990. – 439 p.
3. **Ловчиков, А.В.** Современное состояние проблемы регистрации, прогноза и предупреждения горно-тектонических ударов в рудниках / А.В. Ловчиков // ГИАБ. – 2008. – № 5.
4. **Ловчиков, А.В.** Сильнейшие горно-тектонические удары и техногенные землетрясения на рудниках России / А.В. Ловчиков // ФТПРПИ. – 2013. – № 4. – С. 68-73.
5. **Жадин, В.В.** Природа сейсмических проявлений на руднике «Таштагол» в 1981-1983 г.г. / В.В. Жадин // ФТПРПИ. – 1985. – № 1.
6. Борьба с горными ударами на Таштагольском руднике / Б.В. Шрепп [и др.] // Прогноз и предотвращение горных ударов на рудных месторождениях. – Апатиты: КНЦ РАН, 1987.
7. **Сырников, Н.М.** О механизме техногенного землетрясения в Хибинах / Н.М. Сырников, В.М. Тряпицын // ДАН СССР. – 1990. – Т. 134, № 4.

8. **Садовский, М.А.** Сейсмический процесс в блоковой среде / М.А. Садовский, В.Ф. Писаренко. – М.: Наука, 1991.
9. **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.
10. **Курленя, М.В.** Геомеханические проблемы разработки железорудных месторождений Сибири / М.В. Курленя, А.А. Еременко, Б.В. Шрепп. – Новосибирск: Наука, 2001.
11. Сейсмичность при горных работах / А.А. Козырев [и др.]; под ред. Н.Н. Мельникова. – Апатиты: КНЦ РАН, 2002.
12. Сильнейшее техногенное землетрясение на руднике «Умбозеро»: горнотехнические аспекты / А.А. Козырев [и др.] // Горный журнал. – 2002. – № 1.
13. **Соболев, Г.А.** Физика землетрясений и предвестники / Г.А. Соболев, А.Г. Пономарев / М.: Наука, 2003.
14. О возможных причинах увеличения сейсмической активности шахтных полей рудников «Октябрьский» и «Таймырский» Норильского месторождения в 2003 г.: Ч. 1-4 // ФТПРПИ. – 2004. – № 4-6; 2005. – № 1.
15. **Козырев, А.А.** Системный подход к геомеханическому обеспечению горных работ в энергонасыщенных зонах геологической среды / А.А. Козырев, В.И. Панин, В.А. Мальцев // Геотехнологические проблемы комплексного освоения недр: Геомеханика в горном деле: сб. науч. тр. / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург, 2005. – Вып. 3(93).
16. **Холуб, К.** О реакции массивов горных пород на сокращение подземной добычи угля / К. Холуб // ФТПРПИ. – 2006. – № 1. – С. 18-29.
17. Выделение зон повышенной сейсмоопасности по комплексу прогностических критериев / А.А. Козырев [и др.] // Горный журнал. – 2010. – № 9.
18. **Козырев, А.А.** Геодинамическая безопасность при разработке рудных месторождений в высоконапряженных массивах / А.А. Козырев, В.И. Панин, В.С. Свинин // Горный журнал. – 2010. – № 9.
19. **Козырев, А.А.** Управление геодинамическими рисками на Хибинских апатитовых рудниках / А.А. Козырев, В.И. Панин, И.Э. Семенова // ГИАБ. – 2010. – № 12.
20. **McGarr, A.** Seismic moments and volume changes / A. McGarr // J. Geophys. Res. 81:1487-94, 1976.
21. **McGarr, A.** Some applications of seismic source mechanism studies to assessing underground hazard / A. McGarr // Proc. 1st Int. Cong. Rockbursts and Seismicity in Mines. Ed. N.C. Gay and E.H. Wainwright. Johannesburg: South African Inst. Min. Met. – 1984. – P. 199-208.
22. **Козырев, А.А.** Техногенная сейсмичность как отражение самоорганизации геологической среды в природно-технических системах / А.А. Козырев, В.И. Панин, Ю.В. Федотова // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: тр. конф. / ИГД СО РАН. – Новосибирск, 2011. – Т. 1.
23. **Simpson, D.W.** Two types of reservoir induced seismicity / D.W. Simpson, W.S. Leith, C.H. Scholz // Bull. Seismol. Soc. Am. 78: 2025-40. – 1988.
24. **Simpson, D.W.** Induced seismicity at Nurek reservoir, tadjikistan, USSR / D.W. Simpson, S.Kh. Negmatullaev // Bull. Seismol. Soc. Am. 71: 1561-86. – 1981.
25. О некоторых особенностях реакции горных пород на взрывные воздействия в ближней зоне / М.В. Курленя [и др.] // ДАН СССР. – 1987. – Т. 293. – № 1.
26. Знакопеременная реакция горных пород на динамическое воздействие / М.В. Курленя [и др.] // ДАН СССР. – 1992. – Т. 323. – № 2.

27. **Адушкин, В.В.** От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия – к волнам маятникового типа в напряженных геосредах: Ч. 1 / В.В. Адушкин, В.Н. Опарин // ФТПРПИ. – 2012. – № 2. – С. 3-27.
28. **Курленя, М.В.** О формировании упругих волновых пакетов при импульсном возбуждении блочных сред. Волны маятникового типа v_μ / М.В. Курленя, В.Н. Опарин, В.И. Востриков // ДАН СССР. – 1993. – Т. 333. – № 4.
29. **Курленя, М.В.** Проблемы нелинейной геомеханики / М.В. Курленя, В.Н. Опарин // ФТПРПИ. – 2000. – № 4. – Ч. II; 1999. – № 3. – Ч. 1.
30. **Садовский, М.А.** О размере зон необратимого деформирования при взрыве в блочной среде / М.А. Садовский, В.В. Адушкин, А.А. Спивак // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1989. – № 9.
31. **Курленя, М.В.** Скважинные геофизические методы диагностики и контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород / М.В. Курленя, В.Н. Опарин. – Новосибирск: Наука, 1999.
32. Механический эффект подземного взрыва / В.Н. Родионов [и др.]. – М.: Недра, 1971.
33. **Никифоровский, В.С.** Динамическое разрушение твердых тел / В.С. Никифоровский, Е.И. Шемякин. – Новосибирск: Наука, 1979.
34. **Адушкин, В.В.** проявления крупномасштабного подземного взрыва в неоднородной среде / В.В. Адушкин, А.А. Спивак. – М., 1989. – (Препринт / АН СССР, ИФЗ).
35. **Журавков, М.А.** Динамические срывы по структурным нарушениям в условиях блочно-слоистого массива горных пород. Проблемы, гипотезы, модели / М.А. Журавков, С.С. Андрейко // Материалы, технологии, инструменты. – 1997. – № 2. – С. 76-87.
36. **Журавков, М.А.** Геомеханический мониторинг горных массивов / М.А. Журавков, О.В. Стагурова, М.А. Ковалева // Мн.: Юникап, 2002. – 252 с.
37. **Спивак, А.А.** Релаксационный контроль механической устойчивости локальных участков земной коры / А.А. Спивак // Механика горных пород: материалы X Междунар. конф. – М., 1994. – С. 88-103.
38. **Журавков, М.А.** Проектирование систем сопряженного геоэкологического мониторинга. Системная организация сопряженного геоэкологического мониторинга / М.А. Журавков, Х.Р. Аль-Момани, В.Я. Щерба. – Мн.: Выш. шк., 2003. – 288 с.
39. Оценка влияния разработки нефтяного месторождения на геодинамическое состояние недр / А.А. Барях [и др.] // ФТПРПИ. – 1998. – № 3. – С. 31-42.
40. Эволюция полей напряжений и техногенная сейсмичность при отработке месторождений полезных ископаемых / Л.А. Назаров [и др.] // ФТПРПИ. – 2011. – № 6. – С. 6-13.
41. Особенности прогноза и профилактики мощных динамических явлений в природно-технических системах / А.А. Козырев [и др.] // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: сб. трудов конф. / ИГД СО РАН. – Новосибирск, 2001.
42. **Линдин, Г.Л.** Особенности сейсмоактивности Таштагольского месторождения перед горными ударами / Г.Л. Линдин, Т.В. Лобанова // ФТПРПИ. – 2012. – № 2. – С. 70-79.
43. **Касахара, К.** Механика землетрясений / К. Касахара. – М.: Мир, 1985.
44. **Ловчиков, А.В.** О роли естественных и техногенных факторов в реализации горно-тектонических ударов на рудниках / А.В. Ловчиков, В.П. Гуменников // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: труды междунар. конф., Новосибирск, 2001 г. / Институт горного дела СО РАН. – Новосибирск, 2001 – С. 243-250.

-
45. Влияние взрывов на техногенную сейсмичность в районе Таштагольского месторождения / В.А. Еременко [и др.] // ФТПРПИ. – 2009. – № 5. – С. 66-74.
46. **Бобряков, А.П.** Влияние слабых сотрясений на статически напряженный массив сыпучей среды / А.П. Бобряков // ФТПРПИ. – 2008. – № 2. – С. 3-11.
47. **Собисевич, Л.Е.** Волновые процессы и резонансы в геофизике / Л.Е. Собисевич, А.Л. Собисевич. – М.: ОИФЗ РАН, 2001.
48. **Курленя, М.В.** Волны маятникова типа. Ч.1: Состояние вопроса и измерительно-вычислительный комплекс / М.В. Курленя, В.Н. Опарин, В.И. Востриков // ФТПРПИ. – 1996. – № 3.
49. **Александрова, Н.И.** О затухании маятниковых волн в блочном массиве горных пород / Н.И. Александрова, А.Г. Черников, Е.Н. Шер // ФТПРПИ. – 2006. – № 5. – С. 67-74.
50. **Линьков, А.М.** Об усилении сейсмических волн вблизи нарушений / А.М. Линьков // ФТПРПИ. – 2001. – № 3.
51. **Линьков, А.М.** Усиление волн и динамические явления в горных породах / А.М. Линьков, Р.Д. Дуррхейм // Горная геофизика: сб. докл. Междунар. конф. / ВНИМИ. – СПб., 1998.
52. **Linkov, A.M.** Velocity amplification considered as a phenomenon of elastic energy release due to softening / A.M. Linkov, R.J. Durrheim // In H.P. Rossmannith(ed.), Proc. 3rd Int. Conference on Mechanics of Jointed and Fractured Rock (MJFR-3). – Rotterdam: Balkema, 1998.
53. **Linkov, A.M.** Instability, fracture acceleration and wave amplification / A.M. Linkov // Int. J. Rock Mech. Mining Sci. – 2000. – Vol. 1-2.
54. **Ortlepp, W.D.** High ground displacement velocities associated with rockburst damage / W.D. Ortlepp // Proc. 3rd Int. Symp. On Rockbursts and Seismicity in Mines. Ed. by P. Young. Rotterdam: Balkema, 1993.
55. **McGarr, A.** A mechanism for high wall-rock velocities in rockbursts / A. McGarr // Proc. Workshop on Induced Seismicity (2nd North American Rock Mechanics Symposium). Ed by S. Talebi. Rotterdam: Balkema, 1996.
56. **Ричардс, П.** Мониторинг ядерных взрывов / Пол Ричардс, Вон Юнг Ким // В мире науки. – 2009. – № 5. – С. 42-49.
-

Zhuravkov M.A.

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

Part I. Possibility of a large intensity technogeneous dynamic event as a result of a large-scale development of the mining area

The article is the first part of a series devoted to the consideration of various aspects of the general integrated task of modeling, forecasting and investigation of such classes dynamic processes as technogeneous earthquakes, dynamic separations, directed dynamic phenomena appearing in the rock mass as a result of large-scale mining operations. General questions concerning directed dynamic phenomena (technogeneous earthquakes) as a result of mining operations are considered.

Поступила в редакцию 04.01.2014 г.

УДК 622.831.22

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ
ВСКРЫВАЮЩИХ ВЫРАБОТОК ПРИ ИХ ПРОВЕДЕНИИ
В ПОДРАБОТАННОМ НИЖНЕЙ ЛАВОЙ IV СИЛЬВИНИТОВОМ СЛОЕ
НА РУДНИКЕ 3 РУ ОАО «БЕЛАРУСЬКАЛИЙ»**

Пузанов Д.А., Мозговенко М.С., Губанов В.А. (ЧУП «Институт горного дела», г. Солигорск, Беларусь)

В статье приведены результаты исследований устойчивости вскрывающих выработок № 1 и № 2, пройденных с целью визуальной и инструментальной оценки состояния подработанного IV сальвинитового слоя после его обнажения.

Введение

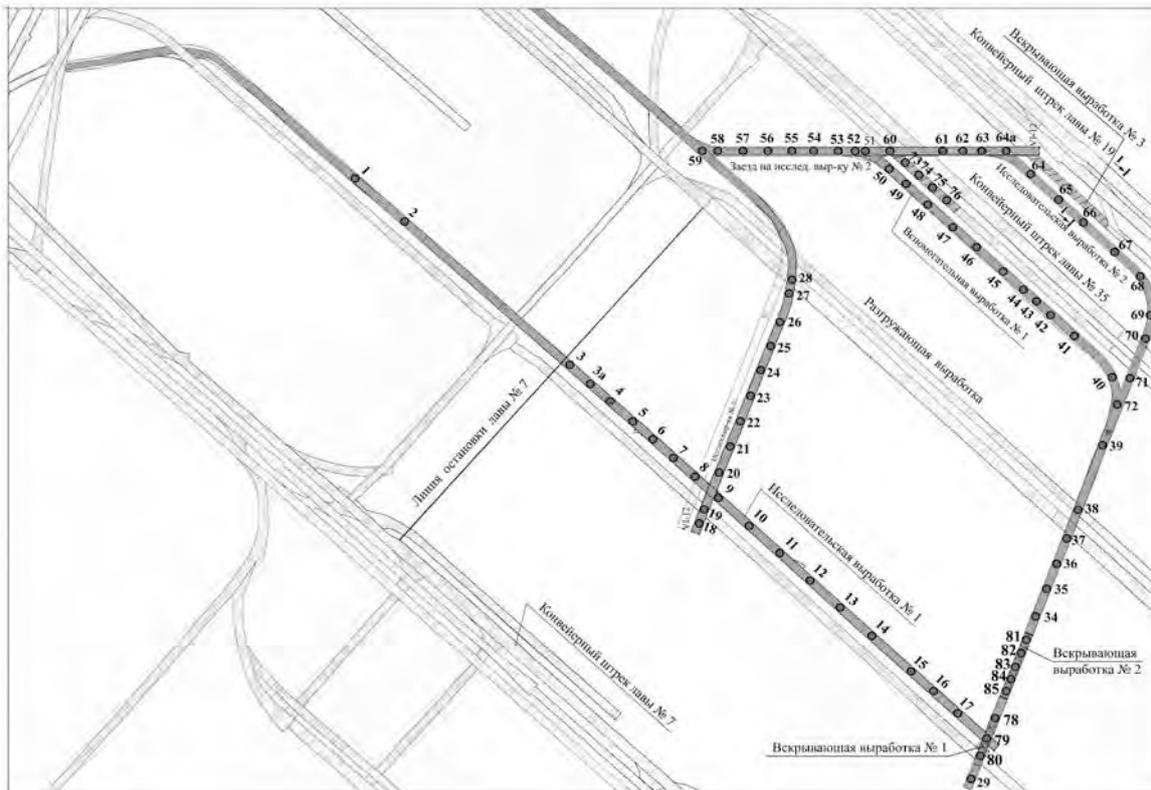
В конце 2011 года на руднике 3 РУ специалистами ОАО «Беларуськалий» совместно с сотрудниками ЧУП «Институт горного дела» были начаты работы, связанные с изучением возможности отработки подработанных нижней лавой по слоям II, II-III, III и оставленных в свое время по разным причинам запасов по IV сальвинитовому слою. Так только на руднике 3 РУ такие запасы составляют 10-15 млн. т руды. Аналогичные запасы по IV сальвинитовому слою были оставлены и на руднике 4 РУ (около 100 млн. т). Учитывая постоянное уменьшение сырьевой базы, а также вывод из эксплуатации в ближайшие 15-20 лет первых двух рудников ОАО «Беларуськалий», вопрос отработки оставленных запасов по IV сальвинитовому слою сегодня является весьма своевременным и актуальным. Тем более, что сегодня есть возможность извлечения этих запасов, используя действующие выработки главных направлений, без привлечения каких-либо материальных и технических средств. Первые исследования возможности извлечения оставленных запасов были начаты на 3-й северо-восточной панели, а затем продолжены на 22-24 западных панелях горизонта -620 м рудника 3 РУ.

Оценка наличия IV сальвинитового слоя на этих панелях, параметров его залегания, характера опускания (разрушения) слоя, пород непосредственной кровли над ним и под ним после их подработки нижней лавой велась путем бурения скважин через обрушенное пространство и отбора керна. По керну строилась геологическая колонка по каждой скважине, а в целом по всем скважинам строились графики с указанием положения IV сальвинитового слоя, а также пород непосредственной кровли над ним. Скважины, в свою очередь, бурились из специально пройденных под нижними лавами исследовательских выработок.

Результаты этих исследований, изложенные в работах [1-3], дали первые представления о характере опускания (обрушения) пород, как самого IV сальвинитового слоя, так и пород непосредственной кровли над ним, а также информацию о состоянии пород каменной соли слоя III-IV, который будет являться почвой предполагаемой лавы по IV сальвинитовому слою. Вышеназванные исследования доказали принципиальную возможность отработки оставленных запасов, но требовали дополнительных исследований, связанных с оценкой устойчивости обнажений при проведении подготовительных выработок в подработанном IV сальвинитом слое и выше него, а также в подработанном слое каменной соли.

Результаты исследований

На совместном совещании специалистов ОАО «Беларуськалий» и ЧУП «Институт горного дела» было принято решение провести исследования устойчивости обнажений в исследовательской выработке № 2, пройденной под лавой № 7, 22 западной панели горизонта -620 м (рисунок 1). Для этих целей кровля выработки была обобрана комбайном 4ПП-2С путем проведения двух вскрывающих выработок с различными привязками.



1 72
 ●...● – номер и место расположения станции; ■■■ – исследовательские выработки;
 ▨ ▨ ▨ – ремонтно-восстановительные работы в разгружающей выработке лавы № 35
 и 24 панельном вентиляционном штреке

Рисунок 1 – Схема проведения исследовательских выработок на 22 и 24 западных панелях горизонта -620 м рудника 3 РУ

При выборе мест заложения вскрывающих выработок исходили из следующего:

- выработки должны располагаться по длине лавы и длине выемочного столба на участках, где полностью восстановлены нагрузки на почву лавы № 7 после выемки нижних слоев;

- выработки должны располагаться вдоль забоя предполагаемой лавы для оценки устойчивости обрушенных пород и последующего выбора забойной крепи, а также оценки возможности проведения по обрушенным породам подготовительных выработок для выемки IV сильвинитового слоя.

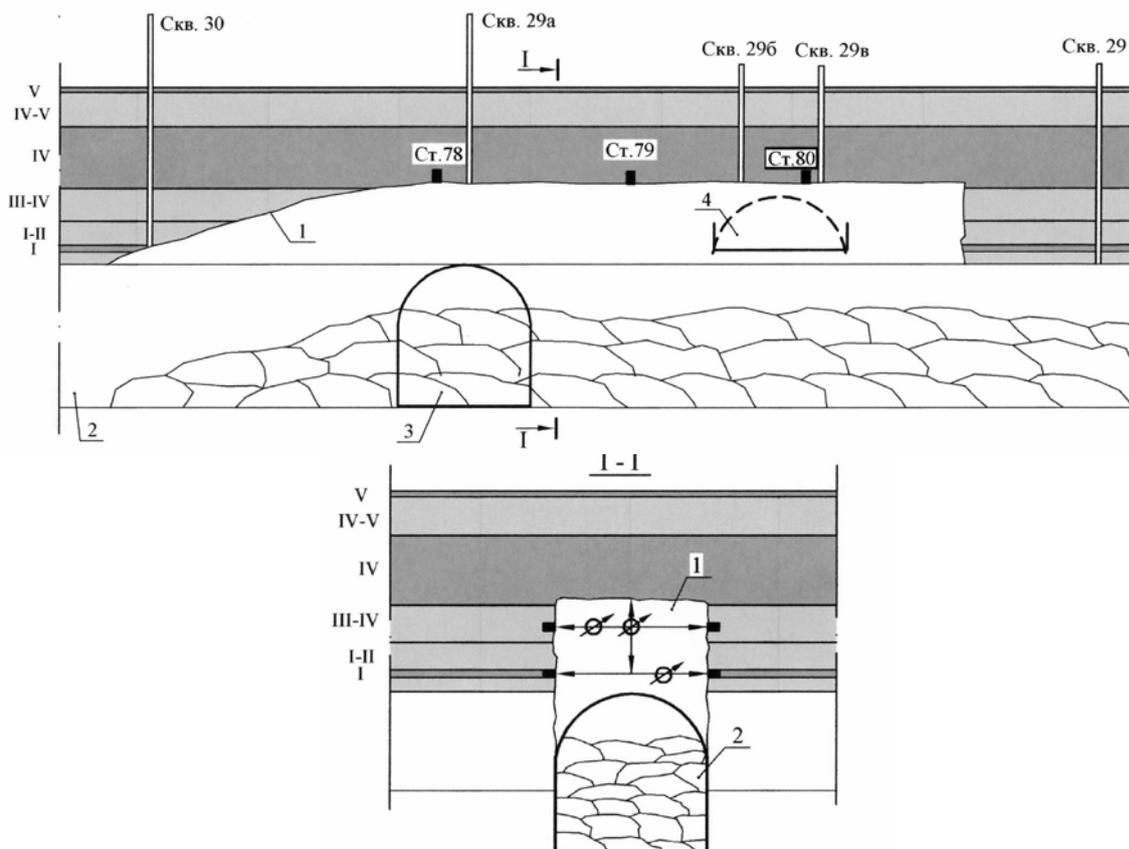
Исходя из сказанного, экспериментальные выработки были расположены в центральной части отработанной лавы № 7 (смотри рисунок 1). Подъем вскрывающих выработок на IV сильвинитовый слой выполнялся комбайном 4ПП-2С с выпуском пород кровли исследовательской выработки № 2 на ее почву.

Вскрывающая выработка № 1 пройдена по кровле второй пачки IV сильвинитового слоя. Длина прямолинейного участка составила 11,5 м (рисунки 1, 2).

Вскрывающая выработка № 2 пройдена с прирезкой 0,2-0,5 м каменной соли IV-V. Длина этого участка 13,5 м (рисунки 1, 3).

Выработки проходились участками длиной по 5 м, после чего комбайн отгонялся, и производилось крепление кровли тремя рядами анкеров КАМВ с расстоянием между рядами 0,8-1,2 м. Длина анкеров составляла 1,5 м.

По контуру выработки через каждые 3 м устанавливались замерные станции по измерению сближения боков и прогиба кровли выработок (рисунки 2, 3).



1 – вскрывающая выработка № 1; 2 – исследовательская выработка № 2;
3 – исследовательская выработка № 1; 4 – бывший вентиляционный штрек лавы № 7

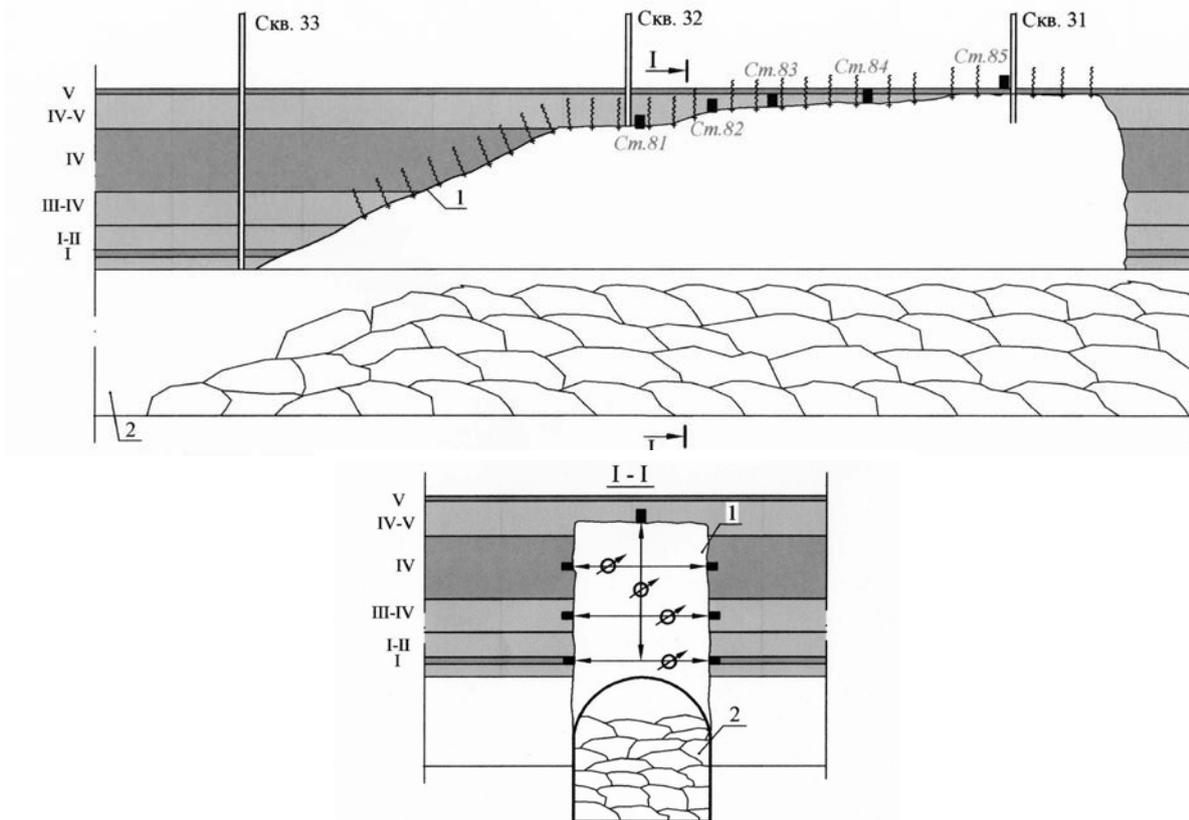
Рисунок 2 – Схема проведения вскрывающей выработки № 1 и места установки замерных станций на 22 западной панели горизонта -620 м рудника 3 РУ

Результаты измерений сближения боков и прогиба кровли давали необходимую информацию об устойчивости контура выработок и являлись прогнозными при проведении последующих участков. Ширина плоской части кровли выработок составляла 1,8-2,2 м, а их ширина 3,0-3,2 м. Проветривание вскрывающих выработок в процессе их проведения выполнялось за счет общешахтной депрессии.

В процессе исследований необходимо было решить следующие задачи:

- исследовать характер опускания (обрушения) IV сильвинитового слоя в горизонтальной плоскости между ранее пробуренными скважинами;
- оценить устойчивость контура вскрывающих выработок при их проведении по обрушенным породам с привязкой кровли под IV сильвинитовый слой и под каменную соль IV-V;

- определить линейные размеры ранее обнаруженных по скважинам пустот, расслоений, трещин вдоль забоя и по длине выемочного столба предполагаемой лавы;
- исследовать характер деформирования контура вскрывающих выработок во времени;
- выполнить прогнозные расчеты срока безремонтного поддержания контура вскрывающих выработок в зависимости от привязки их кровли относительно IV сильвинитового слоя;
- определить оптимальные привязки кровли и места проведения подготовительных выработок для опытной лавы.



1 – вскрывающая выработка № 2; 2 – исследовательская выработка № 2

Рисунок 3 – Схема проведения вскрывающей выработки № 2 и места установки замерных станций на 22 западной панели горизонта -620 м рудника 3 РУ

Общий вид вскрывающих выработок представлен на рисунке 4, а состояние забоя выработок на рисунке 5. Как видно из рисунка 5, каменная соль III-IV, а также IV сильвинитовый слой опускались блоками шириной 0,7-0,8 м вдоль вынимаемого столба, что соответствует ширине вынимаемой полосы лавы № 7. Между блоками отмечались пустоты и трещины. Сами обрушенные блоки имели наклон в сторону забоя лавы. Почва отработанной лавы отчетливо прослеживается по сечению выработки и «проявляется» в виде расслоения по глине, а также наличием забойного мелкого штыба. Бока выработок в сравнении с их забоем выглядели «монолитными» с меньшим количеством пустот и расслоений, а обрушенные породы расположены практически горизонтально с напластованием близким к естественному.

Инструментальные наблюдения были организованы сразу же после проведения вскрывающих выработок. По контуру выработок устанавливались замерные станции на базе контурных реперов для измерения прогиба кровли и сближения боков.

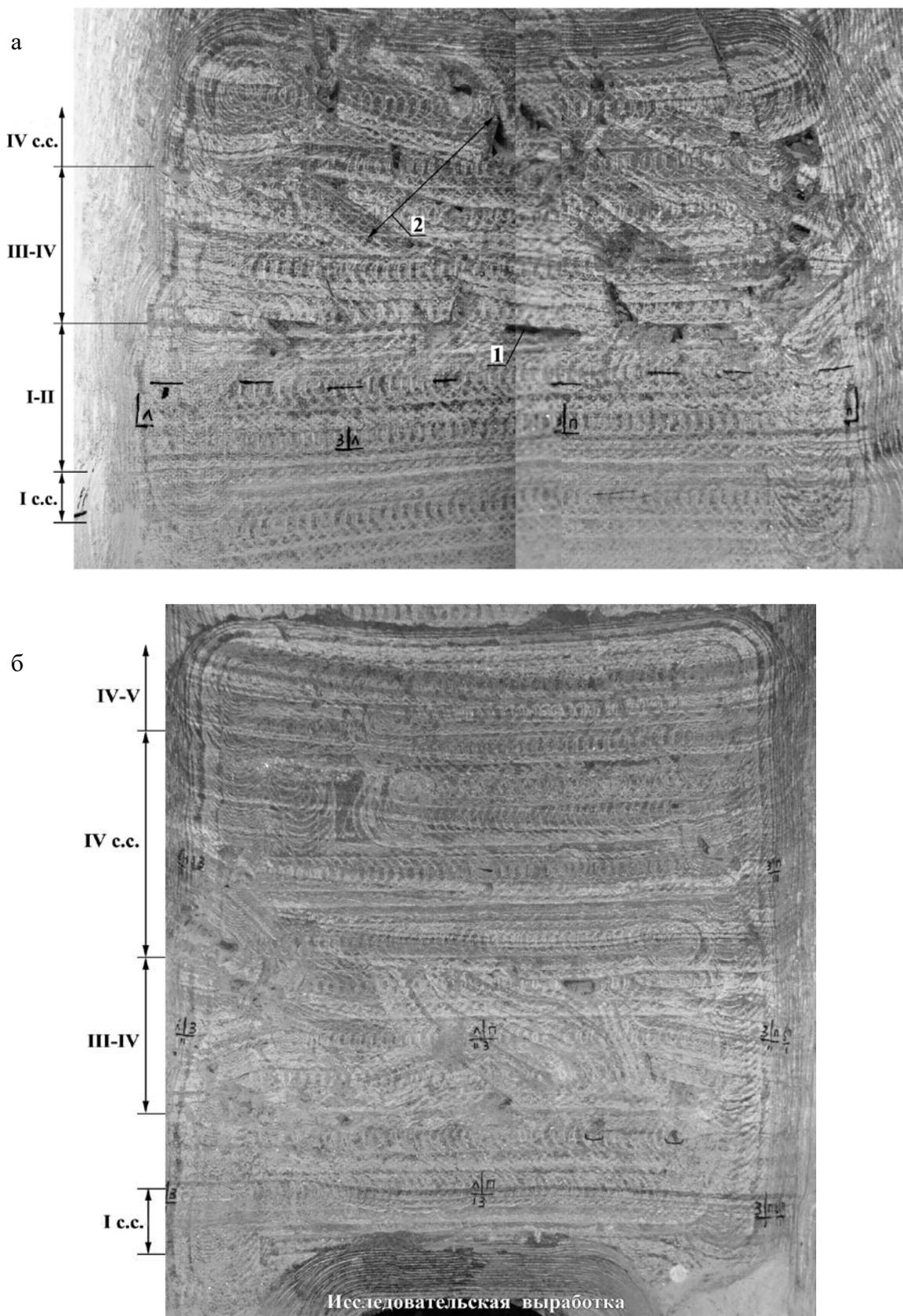
а



б



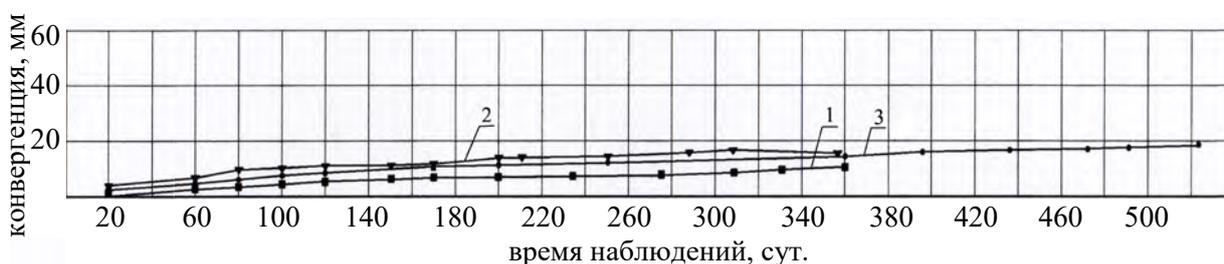
а – вскрывающая выработка № 1; б – вскрывающая выработка № 2
**Рисунок 4 – Состояние контура вскрывающих выработок
через 365-389 суток после их проведения**



а – вскрывающая выработка № 1; б – вскрывающая выработка № 2;
 1 – почва лавы № 7; 2 – IV сильвинитовый слой
Рисунок 5 – Состояние забоев вскрывающих выработок

Для измерения сближения боков устанавливалось по 2-3 станции в каждом отдельном слое (рисунки 2, 3). Прогиб кровли измерялся относительно натянутой лески в нижнем сечении выработок. Измерения сближений боков проводились при помощи лазерной рулетки Leico Disto D5, прогиба кровли – с помощью рулетки ВНИМИ.

Результаты исследований характера деформирования вскрывающихся выработок № 1 и № 2 приведены на рисунке 6 и в таблице. На рисунке 6, кроме измерений прогиба кровли во вскрывающихся выработках, приведены данные о конвергенции исследовательской выработки № 1 на станциях, расположенных в «массиве» (рисунок 1). Пучение почвы на последних станциях отсутствовало, а значит, в основном, по ним велись измерения смещений кровли. Поэтому полученные данные были использованы в качестве «эталонных» и при оценке характера развития прогиба кровли во вскрывающихся выработках.



1 – вскрывающаяся выработка № 1, станции № 78-№ 80; 2 – вскрывающаяся выработка № 2, станции № 81-№ 85; 3 – исследовательская выработка № 1, станция № 2

Рисунок 6 – Сравнительные данные о характере деформирования исследовательских выработок во времени на 22-24 западных панелях горизонта -620 м рудника 3 РУ

Таблица – Сводные данные о характере деформирования и прогнозный расчет срока службы вскрывающихся выработок № 1, № 2 22 западной панели горизонта -620 м рудника 3 РУ

№№ п.п.	Номер станции	Конвергенция, мм	Время наблюдений, сут.	Средняя скорость за период наблюдений, мм/сут.	Оставшееся время службы (без учета времени наблюдений) с учетом средней скорости конвергенции, сут. (лет)	Предельно допустимые значения конвергенции, мм
Вскрывающаяся выработка № 1						
1	78	7,0	389	0,017	4882 (13,37)	90
2	79	8,5	389	0,021	4100 (11,23)	90
3	80	10,0	389	0,025	3200 (8,76)	90
Вскрывающаяся выработка № 2						
4	81	8,5	384	0,022	3704 (10,14)	90
5	82	19,0	386	0,049	1448 (3,96)	90
6	83	16,5	365	0,045	1633 (4,47)	90
7	84	-*	-	-	-	-
8	85	-*	-	-	-	-
* замеры по станции прекращены в связи с отслаиванием пачки соли кровли выработки						

Проведенные исследования и анализ результатов измерений характера деформирования контура вскрывающих выработок позволяют сделать следующие выводы:

- наибольшие значения скорости деформирования контура выработок отмечались в первые 3-4 суток после их проведения, а затем наблюдалось ее затухание;
- скорость сближения боков и прогиб кровли во вскрывающей выработке № 2 в 1,5-2,0 раза выше, чем во вскрывающей выработке № 1;
- скорость сближения боков и прогиб кровли во вскрывающей выработке № 1 по своим значениям близки к аналогичным параметрам для выработок, пройденных в «массиве»;
- наибольшие скорости схождения боков выработок отмечались на участках их проведения по обрушенным породам, в частности, в районе каменной соли III-IV и IV сильвинитового слоя;
- прогнозные расчеты срока службы вскрывающих выработок, выполненные с учетом фактических замеров деформирования элементов их контура, показывают, что вскрывающая выработка № 2, после обрушения пачки мощностью 8-10 см по кровле V сильвинитового слоя, будет находиться в устойчивом состоянии еще не менее 4-х лет, а вскрывающая выработка № 1 – не менее 8 лет;
- проведение вскрывающих выработок вызывает изменение напряженного состояния вблизи их окружающего «массива» на расстоянии до 8-10 м;
- наличие влияния от проходки вскрывающих выработок на напряженное состояние пород вблизи их проведения говорит о том, что нагрузка на почву лавы № 7 после ее проходки восстановлена, а значит, при последующей отработке подработанного IV сильвинитового слоя лавой по ее контуру будет формироваться зона опорного давления, параметры которой необходимо будет исследовать в опытной лаве.

Заключение

Исследования характера деформирования вскрывающих выработок, пройденных в обрушенных породах после выемки слоев II, II-III, III лавой № 7 горизонта -620 м рудника 3 РУ, выполнены впервые на Старобинском месторождении калийных солей. Этими исследованиями доказана принципиальная возможность проведения и поддержания подготовительных выработок по обрушенным породам после их подработки нижней лавой. Выработки сохранили свою устойчивость через 365-389 суток после их проведения (при обеих привязках кровли), что вполне достаточно при использовании их в качестве монтажных, а также, например, в качестве вентиляционного штрека лавы при поэтапном его проведении. Результаты работы использовались в «Исходных данных для разработки проекта отработки 22 западной панели горизонта -620 м рудника 3 РУ опытной лавой № 8-в-3».

Список использованных источников

1. Провести исследовательские выработки под выработанным пространством после выемки II, II-III, III слоев и изучить характер обрушения (зависания) пород в центральной и краевых частях лавы; геологическое строение и прочностные свойства пород по керну, получаемому при бурении скважин через обрушенное пространство вслед за комбайном; наличие пустот, трещин, расслоений на высоту до 5,0 м; наличие газа (газов) в отработанном пространстве в исследовательских выработках, пройденных под лавой № 5 горизонта -620 м 3-й северо-восточной панели: отчет о НИР (промеж. по

дог. № 04/11, этап 1.1.1) / ЧУП «Институт горного дела»; рук. В.А. Губанов; исполн. А.Л. Поляков [и др.]. – Солигорск, 2011. – 185 с. – № ГР 20110438.

2. В исследовательской выработке № 2, пройденной под лавой № 7 горизонта -620 м рудника 3 РУ, с помощью комбайна 4ПП-2С, вскрыть (при постоянном геомеханическом контроле за состоянием выработки) подработанный IV сильвинитовый слой, оценить его фактическое состояние. Выполнить визуальные и инструментальные наблюдения за характером деформирования вскрывающих выработок с привязкой кровли под IV сильвинитовый слой и под каменную соль IV-V: отчет о НИР (промеж. по дог. 05/11, этап 4) / ЧУП «Институт горного дела»; рук. В.А. Губанов; исполн. М.С. Мозговенко [и др.]. – Солигорск, 2013. – 43 с. – № ГР 20114618.

3. **Ерохин К.А.** Исследование характера восстановления нагрузки на почву лавы после выемки нижнего слоя и характера нагружения охранных целиков в условиях Третьего горизонта рудника 3 РУ ОАО «Беларуськалий» / К.А. Ерохин, М.С. Мозговенко, Д.А. Пузанов // Горная механика и машиностроение. – 2012. – № 4. – С. 20-24.

Puzanov D.A., Mozgovenko M.S., Gubanov V.A.

The results of stability research of openings at their driving in the sylvinite layer IV worked by the lower lava in the mine 3 PU's of JSC «Belaruskali»

The paper states the research results of the stability of openings № 1 and № 2 driven for the purpose of visual and tool evaluation of the state of the undermined sylvinite layer IV after its outcrop.

Поступила в редакцию 27.01.2014 г.

УДК 539.6:621.926

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МОЛЕКУЛЯРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

Злотников И.И., Хило П.А. (УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого», г. Гомель, Беларусь), Прушак В.Я., Ахмадиева Л.В. (ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», Беларусь), Шаповалов В.М. (ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси», г. Гомель, Беларусь)

На основе электромагнитной теории молекулярного взаимодействия тел проанализировано поведение технологической жидкости в микротрещине, образующейся при механическом разрушении горной породы. Предложена формула для расчета силы взаимодействия поверхностей материала, разделенных микротрещиной. Показано, что сила взаимодействия поверхностей микротрещины зависит от соотношения между диэлектрическими характеристиками породы и жидкости. Рассмотрена применимость предложенной формулы для прогнозирования эффективности использования конкретных жидкостей при механической обработке горных пород и минералов.

Введение

Разрушение горных пород и минералов является определяющим процессом многих современных технологий: бурение скважин, распиловка и сверление камня, измельчение полезных ископаемых при их обогащении, дробление щебня, диспергирование минералов для получения тонкодисперсных порошков используемых при изготовлении керамики, пигментов, композиционных материалов. Разрушение является сложным физико-механическим и физико-химическим процессом, на протекание которого влияют химический и фазовый состав, структура, анизотропия, распределение напряжений, окружающая среда, параметры процесса разрушения и многие другие факторы.

Одним из наиболее перспективных направлений в совершенствовании процесса разрушения горных пород является использование технологических жидкостей: буровых растворов, смазочно-охлаждающих и расклинивающих жидкостей, поверхностно-активных веществ (ПАВ). Жидкость, проникая в поровые каналы, имеющиеся в породе, и микротрещины, возникающие в твердом теле при воздействии рабочего инструмента, создает в них расклинивающее давление (эффект Ребиндера [1]), способствуя снижению усилия разрушения материала, что в конечном итоге приводит к увеличению производительности и снижению энергозатратности процесса. Известны многочисленные эффекты понижения прочности твердых тел вследствие обратимого физико-химического влияния среды, обусловленные понижением поверхностной энергии при адсорбции ПАВ на поверхностях твердого тела. Отличительная особенность этих явлений заключается в том, что они наблюдаются только при совместном действии среды и определенного напряженного состояния. В этом заключается основная суть эффекта Ребиндера. Адсорбируемые ПАВ, стремясь покрыть всю поверхность тела, проникают в зародышевые трещины и дефекты, мигрируя по их стенкам со скоростью, превышающей скорость всасывания жидкости в зазор. Снижение поверхностной энергии

микротрещин σ внутри материала приводит к облегчению их развития под действием механических напряжений и смещению критерия Гриффитса для разрушающего напряжения P в сторону более низких значений:

$$P = k(\sigma \cdot E / l)^{1/2},$$

где k – коэффициент пропорциональности;

E – модуль упругости материала, Па;

l – ширина зазора, м.

Кроме того, когда молекулы ПАВ достигают зон, где ширина микротрещин примерно равна размеру молекул, адсорбционный слой своим давлением стремится расклинить эту трещину для дальнейшего продвижения молекул. Давление на стенки микротрещины у ее вершины может достигать до 10 ГПа [3].

Из всего вышесказанного следует, что технологическая жидкость, используемая при разрушении горных пород любым способом, должна обладать не только высокой смачивающей способностью (низкой поверхностной энергией), но и снижать силы молекулярного взаимодействия между вновь возникающими при прорастании микротрещин поверхностями, способствуя тем самым снижению механической прочности горной породы.

Цель работы – на основе электромагнитной теории молекулярных сил проанализировать поведение технологической жидкости в микротрещинах, образующихся при механическом воздействии инструмента на горную породу и использовать полученные результаты для прогнозирования перспективности применения конкретных жидкостей в процессах разрушения горных пород и минералов.

Результаты исследований

Теоретические предпосылки. Наиболее общим способом расчета молекулярных сил взаимодействия двух твердых поверхностей диэлектриков является электромагнитная теория Е.М. Лифшица, развитая в работах [4, 5]. В данных работах с помощью квантовой теории поля было получено общее выражение для силы F , действующей на единицу площади каждого из двух конденсированных тел, которые разделены зазором шириной l , заполненным третьей средой.

Хотя формулы, приведенные в этих работах, сложны, современные методы вычислительной техники позволяют рассчитать силу F , если известны зависимости диэлектрических проницаемостей рассматриваемых веществ $\varepsilon_{1,2,3}(i\xi)$ от мнимой частоты. Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon(i\xi)$ связана с мнимой частью комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon''(\omega)$ соотношением Крамерса-Кронига [4, 5]:

$$\varepsilon(i\xi) = 1 + \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\varepsilon''(\omega)\omega}{\omega^2 + \xi^2} d\omega, \quad (1)$$

где ω – частота, Гц;

ξ – частота, Гц;

i – мнимая единица.

Мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости определяет потери энергии электромагнитных волн при их прохождении через вещество. Она связана с показателем преломления n и показателем поглощения среды k посредством соотно-

шения $\varepsilon''=2nk$ и определяется из соответствующих спектров поглощения. Функции $\varepsilon''(\omega)$, таким образом, являются достаточно полными характеристиками твердых тел, которые определяют силу молекулярного притяжения между ними. Однако эти аналитические зависимости плохо известны для большинства материалов. Поэтому для прогнозирования взаимодействия между телами используют различные приближенные формулы.

Когда зазор между телами l мал по сравнению с длинами волн λ , характерными для спектров поглощения взаимодействующих тел (нет запаздывания электромагнитных волн), и температуры малы, т.е. выполняется условие $\frac{lkT}{\hbar c} \ll 1$, формула для силы взаимодействия, согласно данной теории, имеет вид [4]:

$$F(l) = \frac{\hbar}{8\pi^2 l^3} \int_0^\infty \frac{[\varepsilon_1(i\xi) - \varepsilon_3(i\xi)][\varepsilon_2(i\xi) - \varepsilon_3(i\xi)]}{[\varepsilon_1(i\xi) + \varepsilon_3(i\xi)][\varepsilon_2(i\xi) + \varepsilon_3(i\xi)]} d\xi, \quad (2)$$

где T – температура, К;

k – постоянная Больцмана;

\hbar – постоянная Планка;

c – скорость света.

Однако, как отмечалось выше зависимости $\varepsilon_{1,2,3}(i\xi)$ плохо известны для большинства материалов. Поэтому в монографии [6] были получены приближенные формулы для расчета ван-дер-ваальсовых сил, действующих между двумя телами, разделенными зазором l , заполненным жидкостью, в которых принимается во внимание поглощение только в области оптических частот (видимая ультрафиолетовая и инфракрасная области спектра). С учетом сказанного была получена формула, удобная для практического применения [6]:

$$F(l) = \frac{\hbar}{16\pi l^3 \sqrt{2}} \frac{\omega_0(\varepsilon_{10} - \varepsilon_{30})(\varepsilon_{20} - \varepsilon_{30})}{(\varepsilon_{10} + \varepsilon_{30})^{1/2} (\varepsilon_{20} + \varepsilon_{30})^{1/2} [(\varepsilon_{10} + \varepsilon_{30})^{1/2} + (\varepsilon_{20} + \varepsilon_{30})^{1/2}]}, \quad (3)$$

где ω_0 – главная частота поглощения всех трех диэлектриков;

$\varepsilon_{10}, \varepsilon_{20}$, – статические диэлектрические постоянные двух твердых тел;

ε_{30} – диэлектрическая постоянная пленки жидкости.

В частности эту формулу в статье [7] использовали для расчета адгезионной составляющей силы трения при фрикционном взаимодействии некоторых полимеров.

При образовании трещины в горной породе оба взаимодействующих твердых тела одинаковы, поэтому последняя формула принимает вид:

$$F(l) = \frac{\hbar}{32\pi l^3 \sqrt{2}} \frac{\omega_0(\varepsilon_{10}^2 - \varepsilon_{30}^2)^2}{(\varepsilon_{10}^2 + \varepsilon_{30}^2)^{3/2}}. \quad (4)$$

Попытаемся применить последнюю формулу для прогнозирования эффективности использования конкретных жидкостей при механическом разрушении как природных горных пород, так и искусственных материалов аналогичного химического состава.

Диэлектрическая проницаемость основных порообразующих минералов колеблется от 3-4 до 10-11 (например, у кварца – 4,3-5,6, полевых шпатов – 4,5-7,2, слюд –

5,4-11, кальцита – 7,5-8,7, гипса – 4,2-4,3, мрамора – 8-10), и лишь у некоторых более редких минералов, как правило, обладающих полупроводниковыми свойствами, она существенно возрастает (например, у рутила – 86). Значения диэлектрических проницаемостей искусственных материалов: кварцевое стекло – 3,75, стекло техническое – 4-7, керамика (фарфор, стеатит) – 5-7. Сравнивая диэлектрические проницаемости приведенных выше твердых тел, можно сделать вывод, что такая жидкость как вода ($\varepsilon = 81$) не может найти успешного применения в качестве технологической жидкости для процессов, связанных с разрушением горных пород, стекла и керамики, так как у воды диэлектрическая проницаемость значительно выше и, согласно формулы (4), она не сможет снижать силы молекулярного взаимодействия между вновь возникающими при прорастании микротрещин поверхностями.

В то же время многие масла (касторовое, $\varepsilon = 4,8$, силиконовое, $\varepsilon = 4,2$) и такие жидкости как бутиловый спирт ($\varepsilon = 7,9$), метилхлорид ($\varepsilon = 9,1$), тетрагирофуран ($\varepsilon = 7,4$) перспективны с точки зрения рассмотренной выше формулы в качестве технологических жидкостей, так как они обеспечат минимум силы молекулярного взаимодействия стенок трещины.

Однако из патентных источников известно, что при алмазном сверлении и шлифовании керамики, камня, многих минералов, кварцевого и технического стекла используются технологические жидкости, основой которых является вода [8-11], а не упомянутые выше жидкости.

Из этого следует, что формула (4) является очень упрощенной (по всей видимости, использование статических диэлектрических проницаемостей является слишком грубым приближением), не отражает всех особенностей молекулярного взаимодействия, происходящего в узком зазоре между поверхностями микротрещины, заполненной жидкостью и требует дальнейшего уточнения. В связи с вышеизложенным, была предпринята попытка более детального анализа поведения жидкости в узком зазоре и вывода более точных аналитических зависимостей, связывающих силу молекулярного взаимодействия поверхностей и их диэлектрические характеристики.

Анализ поведения жидкости в узком зазоре. Диэлектрики, в том числе горные породы и рассматриваемые жидкости, поглощают электромагнитное излучение селективно – их спектры поглощения имеют вид полос той или иной ширины и интенсивности. Для точного описания взаимодействия диэлектриков необходимо знание функции $\varepsilon''(\omega)$ в широком спектральном диапазоне, которое согласно формуле (1), позволило бы найти функцию $\varepsilon(i\xi)$, после подстановки которой в формулу (2), была бы вычислена и сила взаимодействия поверхностей.

В оптическом диапазоне частот $\omega = 10^{12}$ - 10^{15} Гц (инфракрасная, видимая и ультрафиолетовая области) полную информацию о функции $\varepsilon''(\omega)$ можно получить из спектров поглощения этих материалов.

Для этого, используя закон Бугера, можно найти коэффициент поглощения вещества μ на интересующей частоте ω_0 :

$$\mu(\omega_0) = \frac{1}{L} \ln \frac{I_0}{I},$$

где L – толщина слоя поглощающего вещества, м;

I_0/I – относительная степень поглощения электромагнитного излучения.

По коэффициенту поглощения вещества $\mu(\omega_0)$ можно определить показатель поглощения

$$\kappa(\omega_0) = \frac{\mu(\omega_0)c}{2\omega_0}.$$

Затем по формуле $\varepsilon'' = 2n\kappa$, выбирая значения показателя преломления n для соответствующего частотного диапазона, получить приближенные значения функции $\varepsilon''(\omega)$.

Как отмечалось выше, спектры поглощения диэлектриков имеют вид полос, где наряду с широкими областями прозрачности существуют зоны поглощения. Если пренебречь имеющимся малым поглощением на участках прозрачности, а в полосе поглощения ее значение считать постоянным $\varepsilon''(\omega) = \text{const}$, то спектр диэлектрика будет состоять из ряда прямоугольных полос различной ширины и высоты. Принятое допущение позволяет перейти в формуле Крамерса-Кронига (1) от интегрирования по бесконечной области к интегралу с конечными пределами. Если в первом приближении считать, что у диэлектрика сильное поглощение происходит в пределах только одной полосы частот от ω_0 до $\omega_0 + \Delta\omega$, то переходя к интегрированию в этих пределах и учитывая, что $\varepsilon''(\omega) = \text{const}$ в рассматриваемом диапазоне частот получаем:

$$\varepsilon(i\xi) = 1 + \frac{2}{\pi} \int_{\omega_0}^{\omega_0 + \Delta\omega} \frac{\varepsilon''(\omega)\omega}{\omega^2 + \xi^2} d\omega = 1 + \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\varepsilon''(\omega)}{2} \ln \left(1 + \frac{2\omega_0\Delta\omega}{\omega_0^2 + \xi^2} \right). \quad (5)$$

Учитывая, что величина $\frac{2\omega_0\Delta\omega}{\omega_0^2 + \xi^2} \ll 1$ в рассматриваемом диапазоне оптических частот и, используя известное соотношение $\ln(1+x) \approx x$, справедливое при $x \ll 1$, окончательно получаем:

$$\varepsilon(i\xi) = 1 + \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\varepsilon''(\omega)\omega_0\Delta\omega}{\omega_0^2 + \xi^2}. \quad (6)$$

Если у рассматриваемых материалов сильное поглощение происходит не на одной частоте ω_0 , а на нескольких, то в формуле (6) их вклад будет суммироваться. В этом случае получаем выражение:

$$\varepsilon(i\xi) = 1 + \frac{2}{\pi} \cdot \sum_n \varepsilon''(\omega_n) \frac{\omega_n\Delta\omega_n}{\omega_n^2 + \xi^2},$$

где n – число полос поглощения данного вещества;

ω_n – частота начала n -ой полосы поглощения;

$\Delta\omega_n$ – ширина полосы поглощения;

$\varepsilon''(\omega_n)$ – значение $\varepsilon''(\omega) = \text{const}$ внутри n -ой полосы поглощения.

Проведенный переход дает возможность проводить оценку вклада отдельных спектральных областей, отдельных полос поглощения в диэлектрическую проницаемость материала и, соответственно, в силу взаимодействия. При этом более четко видна роль индивидуальных свойств материалов, связанных с их молекулярным строением химическим составом и структурой, определяющих интенсивность и положение в спектре полос поглощения.

Теперь подставим полученное выражение для функции $\varepsilon(i\xi)$ (6), т.е., ограничившись предположением об одной полосе сильного поглощения, в формулу (2). Будем рассматривать случай, когда взаимодействуют два одинаковых твердых тела, между которыми находится тонкая прослойка третьего вещества. Это соответствует поставленной в данной статье цели об изучении поведения технологической жидкости в узком зазоре магистральной трещины в горной породе. В этом случае получаем выражение:

$$F(l) = \frac{\hbar}{8\pi^2 l^3} \cdot \int_0^\infty \left(\frac{\frac{\varepsilon_1'' \omega_{01} \Delta \omega_1}{\omega_{01}^2 + \xi^2} - \frac{\varepsilon_3'' \omega_{03} \Delta \omega_3}{\omega_{03}^2 + \xi^2}}{\pi + \frac{\varepsilon_1'' \omega_{01} \Delta \omega_1}{\omega_{01}^2 + \xi^2} + \frac{\varepsilon_3'' \omega_{03} \Delta \omega_3}{\omega_{03}^2 + \xi^2}} \right)^2 d\xi, \quad (7)$$

где обозначено $\varepsilon'' = \varepsilon''(\omega)$, индекс 1 относится к поверхностям твердого тела, индекс 3 к жидкости, находящейся между ними.

Используя эту формулу, следует считать частоты, на которые приходится максимум основной полосы поглощения, одинаковыми у всех взаимодействующих тел $\omega_{01} = \omega_{03} = \omega_0$. Это соответствует тому факту, что основной вклад во взаимодействие тел вносят только перекрывающиеся полосы поглощения всех трех диэлектриков [6, 12]. Тогда $\Delta \omega_1 = \Delta \omega_2 = \Delta \omega$ есть не что иное, как ширина зоны перекрытия полос поглощения взаимодействующих диэлектриков.

С учетом этого формула (7) принимает вид

$$F(l) = \frac{\hbar}{8\pi^2 l^3} \cdot \int_0^\infty \left(\frac{\frac{\varepsilon_1'' \omega_0 \Delta \omega}{\omega_0^2 + \xi^2} - \frac{\varepsilon_3'' \omega_0 \Delta \omega}{\omega_0^2 + \xi^2}}{\pi + \frac{\varepsilon_1'' \omega_0 \Delta \omega}{\omega_0^2 + \xi^2} + \frac{\varepsilon_3'' \omega_0 \Delta \omega}{\omega_0^2 + \xi^2}} \right)^2 d\xi. \quad (8)$$

После преобразований получаем

$$F(l) = \frac{\hbar}{8\pi^2 l^3} \cdot \omega_0^2 \Delta \omega^2 (\varepsilon_1'' - \varepsilon_3'')^2 \int_0^\infty \frac{d\xi}{(\pi \omega_0^2 + \omega_0 \Delta \omega (\varepsilon_1'' + \varepsilon_3'') + \pi \xi^2)^2}. \quad (9)$$

Проведя интегрирование, находим силу взаимодействия двух одинаковых диэлектриков (горной породы), разделенных тонким слоем третьего диэлектрика (жидкости).

$$F(l) = \frac{\hbar}{32l^3} \cdot \frac{\omega_0^2 \Delta \omega^2 (\varepsilon_1'' - \varepsilon_3'')^2}{[\pi^2 \omega_0^2 + \pi \omega_0 \Delta \omega (\varepsilon_1'' + \varepsilon_3'')]^{3/2}}. \quad (10)$$

Из полученной формулы видно, что сила взаимодействия будет минимальной, $F \rightarrow 0$, если $\varepsilon_1'' \rightarrow \varepsilon_3''$ и/или $\Delta \omega \rightarrow 0$ (область перекрытия полос поглощения минимальна или ее вообще нет).

Для качественного прогнозирования влияния жидкости, находящейся в узком зазоре, на силу взаимодействия твердых поверхностей формулу (10) можно еще более

упростить. Так как ω_0^2 значительно больше произведения $\omega_0 \Delta\omega$, а величина суммы $(\varepsilon_1'' + \varepsilon_3'')$ не превышает для рассматриваемых диэлектриков значения в несколько единиц, слагаемым $\pi\omega_0 \Delta\omega (\varepsilon_1'' + \varepsilon_3'')$ в знаменателе формулы (10) можно пренебречь. Окончательно получаем:

$$F(l) = \frac{\hbar}{32\pi^3 l^3} \cdot \frac{\Delta\omega^2 (\varepsilon_1'' - \varepsilon_3'')^2}{\omega_0}. \quad (11)$$

Сравнение формул (4) и (11) показывает, что сила взаимодействия двух поверхностей твердого тела, разделенных тонким слоем жидкости, зависит не только от соотношения между значениями диэлектрических проницаемостей твердых тел и жидкости, но и от степени поглощения электромагнитных волн этими веществами. А кроме того, в значительной мере определяется шириной зоны перекрытия полос поглощения тела и жидкости.

Проанализируем возможность применения полученных результатов для практической оценки перспективности использования конкретных жидкостей при разрушении и диспергировании горных пород. Сила притяжения двух стеклянных поверхностей, разделенных слоем жидкости, как отмечалось выше, будет зависеть от того как сильно и в какой области спектра перекрываются полосы поглощения этих веществ и от интенсивности этих полос.

В работе [13] приведены точные значения спектральных характеристик воды (показатели преломления n и поглощения k), на основе которых можно сделать вывод, что наибольшее поглощение электромагнитных волн водой происходит в диапазоне длин волн с максимумом около 1 см, т.е. в микроволновом диапазоне. В этом диапазоне значение ε'' достигает величины 20-30 единиц, а в инфракрасном диапазоне длин волн поглощение воды выражено во много раз слабее, $\varepsilon'' = 1-3$. Что касается горных пород, то из работ [14-17] следует, что их основные минеральные компоненты в микроволновом диапазоне ($\lambda = 2-25$ мм) поглощают электромагнитные волны во много раз слабее, чем вода, а их основное поглощение приходится на инфракрасный диапазон с длинами волн ($\lambda = 2-35$ мкм).

Таким образом, главные полосы поглощения в спектрах воды и большинства горных пород не перекрываются, что согласно формуле (11) объясняет перспективность использования воды (в отличие от упомянутых выше жидкостей) в качестве технологической жидкости в процессах их разрушения и диспергирования.

Еще большего эффекта следует ожидать при использовании жидкостей, которые имеют значительно меньшую поглощательную способность, чем вода в широком диапазоне длин волн. Анализ спектров поглощения веществ, приведенных в различных атласах (например [18]), показывает, что такими жидкостями могут быть жидкие парафины линейного строения (циклические имеют интенсивное поглощение в ультрафиолетовой и инфракрасной области). Эксперименты по дроблению горных пород в углеводородных жидкостях (керосин, соляровое масло) показали, что применение данных жидкостей значительно повышает производительность процесса дробления [19]. Кроме того, использование полученных закономерностей позволило авторам данной статьи разработать новую жидкость для резки и сверления стекла и керамики, включающую жидкий парафин (20-92 мас. %) и изооктан.

Следовательно, даже качественный анализ спектров поглощения жидкостей, основанный на выводах, следующих из формулы (11), позволяет успешно прогнозировать

их пригодность для оценки эффективности использования технологических жидкостей при разрушении и измельчении горных пород.

Заключение

Таким образом, чтобы жидкость, находящаяся в узком зазоре, обеспечивала минимальную силу притяжения твердых поверхностей (в частности, поверхностей трещины, растущей под обрабатывающим инструментом в горной породе) необходимо:

1) отсутствие взаимно перекрывающихся полос поглощения в спектрах горной породы и жидкости, а при невозможности обеспечения этого условия ширина зоны перекрытия полос должна быть минимальной;

2) если имеется выраженное взаимное перекрытие полос, то поглощающая способность жидкости и горной породы должна быть одинаковой, что можно оценить, сравнивая величины $\varepsilon'' = 2nk$ для обоих веществ в зоне поглощения;

3) перспективными технологическими жидкостями, ускоряющими процесс разрушения и диспергирования горных пород, являются жидкие парафины линейного строения.

Список использованных источников

1. **Ребиндер, П.А.** Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформации и разрушения / П.А. Ребиндер, Е.Д. Шукин // УФН. – 1972. – Т. 108, вып. 1. – С. 3-42.
2. **Киттель, Ч.** Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель. – М.: Мир, 1978. – 646 с.
3. **Гаркунов, Д.Н.** Триботехника / Д.Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
4. **Дзялошинский, И.Е.** Общая теория ван-дер-ваальсовых сил / И.Е. Дзялошинский, Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский // Успехи физических наук. – 1961. – Т. 73, вып. 3. – С. 381-422.
5. **Ландау, Л.Д.** Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1982. – 624 с.
6. **Israelichvili, J.N.** Intermolecular and Surface Forces. – London: Academic Press, 1991. – 450 с.
7. **Айнбиндер, С.Б.** Адгезионное взаимодействие при трении металл-полимерных и полимер-полимерных пар / С.Б. Айнбиндер, А.Я. Логинова // Механика полимеров. – 1976. – № 5. – С. 831-837.
8. Смазочно-охлаждающая жидкость для механической обработки материалов: пат. 2168539 РФ, МПК С 10 М 173/02 / Л.П. Ануфриев, Ю.В. Котляров. – № 2000126517/04; заявл. 23.10.00; опубл. 10.06.01 // Бюл. № 25.
9. Смазочно-охлаждающая жидкость для механической обработки стекла и диэлектриков: пат. 2062293 РФ, МКИ С 10 М 173/02 / В.С. Кондратенко, Ю.В. Котляров, А.И. Зуй. – № 94007789/04; заявл. 02.03.94; опубл. 20.06.96 // Бюл. № 23.
10. Состав смазочно-охлаждающей жидкости для механической обработки природный камней: пат. 2047656 РФ, МПК С 10 М 173/02 / М.В. Петров, А.И. Никитин, Г.П. Шалунов. – № 93036546/04; заявл. 15.07.93; опубл. 10.11.95 // Бюл. № 22.
11. Смазочно-охлаждающая жидкость для механической обработки стекла и других материалов: пат. 2475522 РФ, МПК С 10 М 173/00, С 10М 173/02 / В.С. Кондратенко, Н.И. Кобыш. – № 2011150867/04; заявл. 14.12.11; опубл. 20.02.13 // бюл. № 5.

12. Левин, М.Н. Теория равновесных тепловых флуктуаций в электродинамике / М.Л. Левин, С.М. Рытов. – М.: Наука, 1967. – 308 с.
13. Юхневич, Г.В. Инфракрасная спектроскопия воды / Г.В. Юхневич. – М.: Наука, 1985. – 217 с.
14. Определение диэлектрических характеристик рудных минералов в микроволновом диапазоне / В.В. Тихонов [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. – 2008. – Т. 51, № 12. – С. 1071–1080.
15. Лабораторные исследования радиофизических и диэлектрических свойств минералов и горных пород в микроволновом диапазоне / В.В. Тихонов [и др.]. – М.: ИКИ РАН, 2011. – 40 с.
16. Плюснина, И.И. Инфракрасные спектры силикатов / И.И. Плюснина. – М.: МГУ, 1967. – 190 с.
17. Шишелова, Т.И. Практикум по спектроскопии. Вода в минералах: учеб. пособие / Т.И. Шишелова, Т.В. Созинова, А.Н. Коновалова. – М.: Академия Естествознания, 2010. – 47 с.
18. Сайт Национального института стандартов и технологии США [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi>.
19. Зомбек, П.В. Электроимпульсная технология получения щебня и его использование в асфальтобетонных смесях: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 27.12.05 / П.В. Зомбек; ТГАСУ. – Томск, 2005. – 24 с.

Zlotnikov I.I., Khilo P.A., Prushak V.Ja., Akhmadieva L.V., Shapovalov V.M.

Analysis of peculiarities of molecular interaction at destruction of rocks with the usage of process liquids

On the basis of electromagnetic theory of molecular interaction of bodies the authors analyse the behavior of a process liquid in the microcrack which is formed at mechanical destruction of rock. The formula for calculation of interaction force of the material surfaces divided by a microcrack is introduced. It is shown that interaction force of a microcrack depends on relation between dielectric characteristics of the rock and the liquid. The applicability of the introduced formula for forecasting the efficiency of the concrete liquids at mechanical treatment of rocks and minerals is considered.

Поступила в редакцию 11.02.2014 г.

УДК 622.831.1.327

**ВЫБОР МЕСТ ЗАЛОЖЕНИЯ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК
ПРИ ИХ ПРОВЕДЕНИИ В ОХРАННЫХ МЕЖДУСТОЛБОВЫХ ЦЕЛИКАХ
ЧЕРЕЗ 25-30 ЛЕТ ПОСЛЕ ЗАВЕРШЕНИЯ ОЧИСТНЫХ РАБОТ
В СМЕЖНООТРАБОТАННЫХ ЛАВАХ**

Губанов В.А., Пузанов Д.А., Мозговенко М.С., Михеев И.А. (ЧУП «Институт горного дела», г. Солигорск, Беларусь)

В статье приведены результаты анализа известных исследований, а также результаты фактических исследований характера нагружения между столбовых целиков на Старобинском месторождении калийных солей, на основании которых даны рекомендации по оптимальному выбору мест заложения подготовительных выработок для отработки оставленных запасов в этих целиках.

Введение

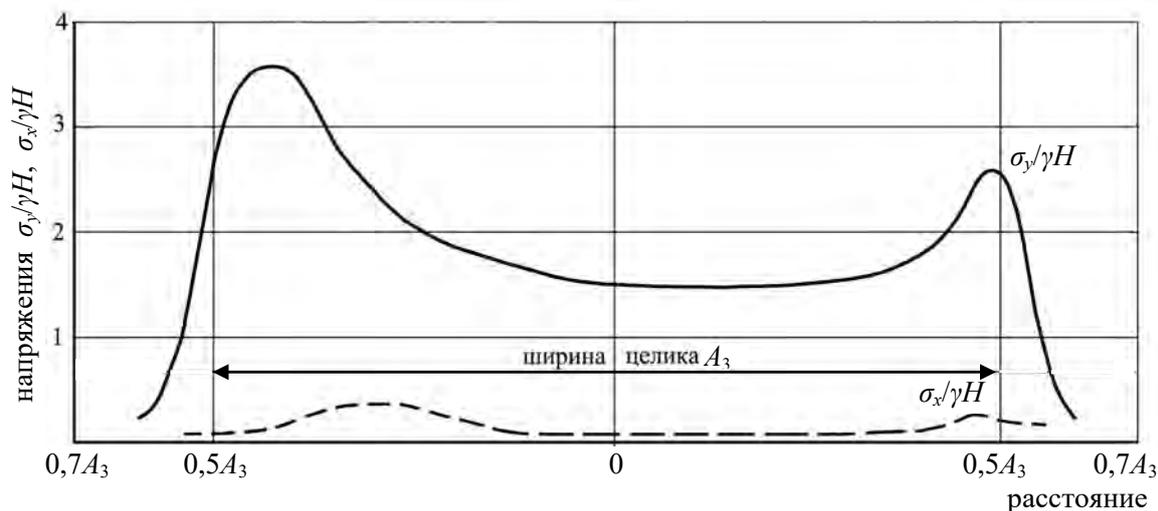
В настоящее время, спустя 55 лет после ввода в эксплуатацию Старобинского месторождения калийных солей, отмечается существенное уменьшение запасов полезного ископаемого на действующих рудниках, что может в ближайшие годы привести к постепенному затуханию добычи руды из недр. Для поддержания достигнутых показателей по добыче руды на этих рудниках изыскиваются дополнительные возможности по увеличению сырьевой базы. Так на руднике 1 РУ ведется отработка ранее законсервированных запасов на I калийном горизонте, а также на обогатительную фабрику перебрасывается по конвейерной линии руда с Березовского участка рудника 4 РУ. Для поддержания мощностей на 2 РУ начата разработка запасов на Краснослободском руднике. Ведется проработка технических решений по вовлечению в отработку запасов Нежинского участка Старобинского месторождения, а также новых месторождений, например, Петриковского. Тем не менее, срок службы действующих рудников ОАО «Беларуськалий», на наш взгляд, можно продлить и за счет вовлечения в отработку ранее оставленных запасов в между столбовых (между панельных) охранных целиках, ширина которых изменяется (в зависимости от конкретных рудников) в интервале от 40 м до 200 м. Ниже приводятся результаты исследований по оценке возможности отработки запасов полезного ископаемого в охранных между столбовых целиках.

Результаты исследований

Одним из главных вопросов при отработке охранных между столбовых целиков является вопрос проведения и выбора мест заложения подготовительных выработок для отработки этих целиков, которые, как правило, расположены с обеих сторон в выработанном пространстве от ранее отработанных лав. Правильный выбор мест заложения подготовительных выработок, с точки зрения их устойчивости, зависит от характера нагружения охранных целиков после его подработки смежно расположенными лавами в зоне их остаточного опорного давления, где отмечаются наибольшие нагрузки на целик от вышележащих пород.

Нагрузка от вышележащих пород по длине лав в этом случае распределяется частично на почву лав, а частично на опорный и охранный целик между лавами. Из-за отсутствия возможности проведения натуральных исследований в выработанном про-

странстве позади лав, такие работы выполнялись в лабораторных условиях на различного рода моделях. Так в работе [1] характер нагружения междустолбового целика изучался для Третьего калийного пласта на моделях из оптически активных материалов. Ширина междустолбового целика в этом случае принималась в интервале 30-55 м. Характер распределения напряжений (вертикальных σ_y и горизонтальных σ_x) одной из моделей по ширине целика приведен на рисунке 1 [1].



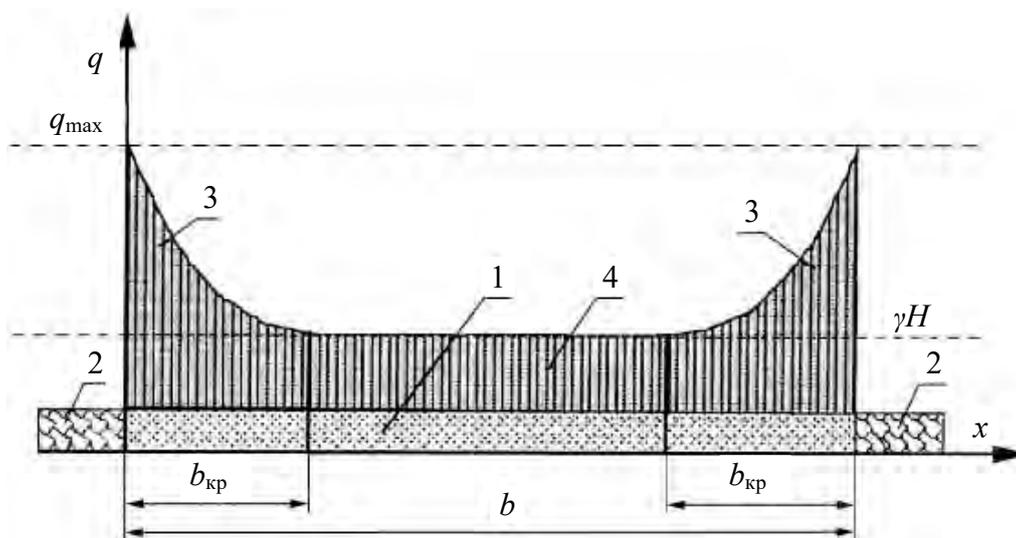
σ_y – вертикальная составляющая напряжений; σ_x – горизонтальная составляющая напряжений; γ – объемный вес пород; H – глубина разработки; A_3 – ширина целика в третьей модели ($A_3 = 55$ м)

Рисунок 1 – Характер распределения нагрузки на целик

Эпюра распределения напряжений по ширине целика отражает ситуацию на тот момент, когда целик был подработан вначале одной лавой, а затем – второй, без оценки изменения напряжений во времени, и особенно, в зоне остаточного опорного давления смежнорасположенных через целик лав. Аналогичный характер изменения напряжений в целике в момент его формирования и нагружения приведен в работе [2] и на рисунке 2.

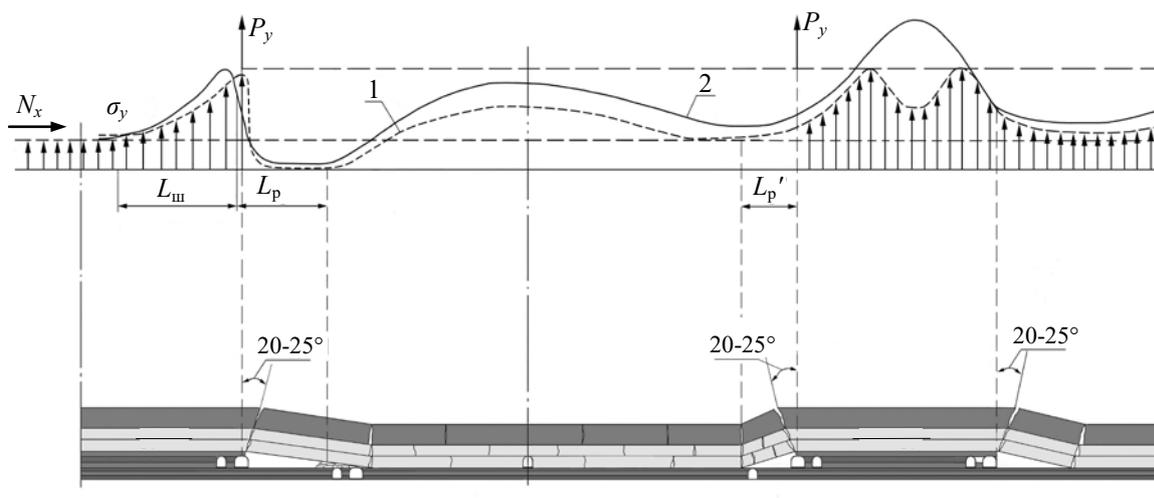
Оценивая результаты этих исследований необходимо отметить некоторое сходство в распределении напряжений (нагрузки) по ширине целика, а именно: наибольшие напряжения отмечаются в краевых частях целика, наименьшие в его центральной части. По результатам исследований авторами вышеназванных работ были выданы рекомендации о расположении подготовительных выработок в центральной части охранного целика и разработаны соответствующие технологии по его отработке. Как отмечалось выше, такая ситуация с нагружением целика возникает в первоначальный момент его нагружения, а вот как изменяется нагрузка по ширине целика во времени в этих работах ничего не сказано. В работе [3] описывается ситуация с нагружением целика позади лав в зоне их остаточного опорного давления на расстоянии до 500 м. Исследования выполнялись в специально пройденных в целиках технологических сбоях, доступ в которые был возможен в течение 8-10 месяцев после прохода лав. Характер распределения нагрузки на почву лавы и охранный целик, построенный по результатам этих исследований, приведен на рисунке 3.

Как видно из рисунка 3, распределение нагрузки на охранный целик в начальной стадии ее формирования имеет «двугорбый характер», т.е. такой же, как и в работах [1, 2], а затем через 8-10 месяцев эта эпюра распределения нагрузки преобразуется в «одногорбую». Максимальные напряжения (нагрузка) при этом отмечаются в центральной части охранного целика.



b – ширина целика; $b_{кр}$ – ширина краевых зон целика; q_{max} – максимальная интенсивность нагрузки на целик; 1 – междупанельный целик; 2 – выработанное пространство; 3 – зоны повышенного опорного давления; 4 – зона равномерной нагрузки

Рисунок 2 – Эпюра распределения вертикальной составляющей напряжений в междустолбовом целике

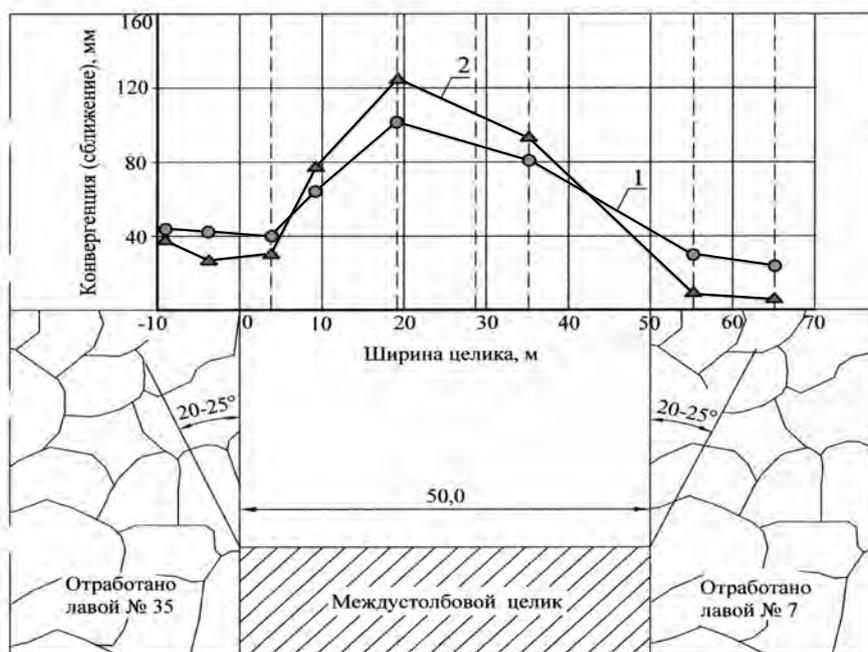


1 – при отходе лавы на расстояние до 200 м от технологической сбойки («двугорбый характер»); 2 – при отходе лавы на расстояние свыше 500 м («одногоорбый характер»); $L_{ш}$ – ширина зоны бокового опорного давления; P_y – нагрузка от веса обрушенных пород; σ_y – вертикальная составляющая напряжений; N_x – продольные силы, действующие со стороны «массива»; L_p, L_p' – зона полной разгрузки соответственно со стороны «массива» и охранного целика, $L_p > L_p'$; 20-25° – углы обрушения пород кровли над лавой

Рисунок 3 – Характер распределения нагрузки на почву лавы, краевую часть «массива» и охранный междустолбовой целик

Во всех исследованиях ширина охранного целика составляла 30-55 м. При меньших размерах целиков, по всей видимости, максимальные нагрузки (из-за разрушения краевой части целиков) будут сразу находиться в центральной части. При ширине целиков более 55 метров (например, 100 и более метров) в характере нагружения целиков будет преобладать «двугорбый» вариант. Выводы о характере нагружения междустолбовых целиков будут неполными, если мы не будем знать, как формируется на-

грузка на целик через большой промежуток времени, чем 8-10 месяцев (как отмечалось в работе [3]). Для практических целей необходимо иметь информацию через 10-15 и более лет (исходя из фактического состояния горных работ на панелях) после начала формирования нагрузки. Авторам настоящей статьи такая возможность была предоставлена. Исследования характера нагружения междустолбового целика через 29-30 лет после начала формирования пригрузки были выполнены на руднике 3 РУ, где в настоящее время ведутся работы, связанные с вовлечением в отработку оставленных и подработанных запасов по IV силвинитовому слою. Предварительная информация (через 100 суток наблюдений) о характере распределения нагрузки на междустолбовой целик, расположенный между лавами № 35 и № 7 горизонта -620 м 22-24 западных панелей была изложена в работе [4]. Наблюдения за характером нагружения целика выполнялись в исследовательских выработках и технологических сбойках, пройденных в этом целике. К моменту написания статьи время наблюдений составило уже 590 суток. Оценка распределения нагрузки на целик выполнялась путем измерения характера деформирования контура исследовательских выработок, в частности – путем измерения конвергенции «кровля - почва» и схождения боков по станциям контурных реперов, которые располагались через 10-15 м по ширине целика. Результаты этих исследований приведены на рисунке 4.



1 – конвергенция «кровля - почва» исследовательской выработки;
2 – схождение боков выработки

Рисунок 4 – Характер нагружения междустолбового целика через 30 лет после формирования зоны остаточного опорного давления

Как видно из рисунка 4 наибольшая нагруженность целика отмечается в его центральной части, наименьшая – в краевых частях. При этом нагрузка в краевых частях междустолбового целика (на расстоянии до 10 м к центру целика) соизмерима по величине с нагрузкой, которая наблюдается в краевой части на почве лавы, т.е., как в краевых частях целика, так и в краевых частях по длине лавы существуют зоны пониженных напряжений (нагрузок), где необходимо располагать подготовительные выработки при отработке охранных целиков.

Заключение

На основании анализа научно-технических источников и фактических данных в области исследования характера нагружения междустолбовых (междупанельных) целиков необходимо сделать следующие выводы:

- при ширине целиков в пределах 40-55 метров, даже через 30 лет после начала их нагружения, зоны повышенных нагрузок (напряжений) наблюдаются в их центральной части, а в краевых частях этих целиков (на расстоянии до 10 м) существуют зоны пониженных нагрузок;

- подготовительные выработки, для обеспечения их устойчивости и снижения затрат на их поддержание, рекомендуется проходить в зонах пониженных нагрузок на расстоянии не менее 3,0 м и не более 5,0 м от боков целика;

- наличие повышенных нагрузок и знакопеременных деформаций в целике и на границе с выработанным пространством, а значит и в налегающей толще пород до поверхности, необходимо учитывать при строительстве дорог, путепроводов, промышленных и гражданских объектов над оставленными целиками;

- для уменьшения негативного воздействия оставленных целиков на вышележащие горизонты и земную поверхность необходимо их (по возможности) обрабатывать.

Список использованных источников

1. Усовершенствовать параметры слоевой выемки Третьего пласта с целью сокращения потерь в охранных целиках: отчет о НИР (промеж. по дог. № 070СДЛ) / ВНИИГ; рук. А.В. Андреев; исполн. Максимова Е.Н. [и др.]. – Ленинград, 1989. – 25 с.

2. Способ отработки междупанельных целиков: пат. 2254468 РФ, МПК Е 21 С 41/16 / С.А. Толстунов, С.Л. Блохин; заявитель Государственное образовательное учреждение профессионального образования Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова (технический университет).

3. **Губанов, В.А.** Исследования проявлений горного давления при слоевой выемке Третьего калийного пласта / В.А. Губанов, В.Я. Прушак, В.Я. Щерба, А.Л. Поляков // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2003. – Т. 8, № 1. – С. 84-92.

4. **Ерохин К.А.** Исследование характера восстановления нагрузки на почву лавы после выемки нижнего слоя и характера нагружения охранных целиков в условиях Третьего горизонта рудника 3 РУ ОАО «Беларуськалий» / К.А. Ерохин, Д.А. Пузанов, М.С. Мозговенко // Горная механика и машиностроение. – 2012. – № 4. – С. 20-24.

Gubanov V.A., Puzanov D.A., Mozgovenko M.S., Mikheev I.A.

Choice of points of emplacement of development workings at their driving in protective intercolumn pillars in 25-30 years after carrying out the winning operations in lavas worked-out contiguously

The analysis results of known researches and the results of actual researches of loading behavior of intercolumn pillars at the Starobin potassium deposit are presented in the paper. According to these results recommendations are given for an appropriate choice of points of emplacement of developing workings for mining the reserves in these pillars.

Поступила в редакцию 13.02.2014 г.

УДК 622.812:658.26-027.236(476)

ИННОВАЦИОННЫЕ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА БРИКЕТОВ ИЗ ТОРФА

Березовский Н.И. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь), Борисейко В.В. (РУП «Белниитоппроект», г. Минск, Беларусь)

Представлены результаты изучения европейского опыта по переработке сыпучих материалов для производства энергии на международной выставке «HANNOVER MESSE 2012», проработки технологий и оборудования производителей Германии через Белорусскую торгово-промышленную палату. Предложены отечественные инновационные энерго- и ресурсосберегающие технологии получения торфяного топлива.

Введение

В современных условиях рыночных отношений очень актуальны вопросы модернизации предприятий. Традиционно сложившееся мнение о прогрессивных западно-европейских технологиях обязывает изучать их и внедрять на промышленных предприятиях республики. В связи с тем, что во многих европейских странах торф признан не возобновляемым источником энергии, и на законодательном уровне предусмотрены стимулирующие льготы и выплаты производителям энергии только лишь из возобновляемых источников энергии, оборудование и технологии переработки торфа для нужд энергетики не получили широкого развития.

В Республике Беларусь одним из ведущих направлений механической переработки торфа является брикетирование. Торфяные брикеты – удобное и выгодное, в первую очередь, бытовое топливо. Они содержат мало влаги (14-20 %) и обладают высокой теплотой сгорания (до 4500 ккал/кг). Одна тонна брикетов заменяет 2,5-3 м³ дров или 1,6 т бурого угля. Использование 1 га торфяной залежи на добычу фрезерного торфа и выработку брикетов позволяет сохранить до 30 га леса [1]. В последнее время набирает обороты использование торфяного топлива в промышленности.

Результаты изучения европейского опыта

Для торфяной отрасли Республики Беларусь представляют интерес технологии и оборудование основных европейских стран по переработке сыпучих материалов (возобновляемые источники энергии – биомасса из кукурузы, соломы, опавших листьев, древесных опилок и др.), для их дальнейшего сжигания и получения тепла и энергии, а также получение биогаза из биомассы, фекалий крупного рогатого скота и куриного помета. Предлагаемые технологии представлены в виде комплексных системных решений: сбор, доставка, хранение, подготовка, переработка и различные направления использования энергии.

Технологии и оборудование для получения топлива из биомассы очень близки к технологии получения торфяных брикетов и пеллет, используемых в торфяной отрасли Республики Беларусь. Отличительной особенностью некоторых комплексов является применение закрытых систем подачи сырья на подготовку, сушку (варку опавших листьев, разработка компании SUNCOAL), прессование. При этом, в бункерах-накопителях используются подвижные конвейеры с гидроцилиндрами (SUNCOAL), широкое применение получил пневмотранспорт с нагнетающими или всасывающими системами (разработка компании NESTRO). Все системы технологического транспорта оснащены рукавными фильтрами (разработчики: TSF-FILTER, PIONIER, NESTRO,

SIMATEK), позволяющими повторно применять отфильтрованное сырье, что значительно улучшает культуру производства, увеличивает выход товарной продукции и сводит до минимума выбросы в окружающую среду.

Термокороба с электроподогревом (разработчик компания ELPO) обеспечивают подачу влажной (до 50 %) биомассы вне зданий и сооружений при температуре до -15 °С, устойчивую работу при температуре до -10 °С, более мощный нагрев электричеством становится экономически невыгодным. Для исключения промерзания в климатических условиях Беларуси (до -30 °С) при передаче пневмотранспортом вне зданий и сооружений увлажненной биомассы от модуля к модулю целесообразнее применять обогрев основных рукавов или коробов приточными рукавами с подачей теплого воздуха от основного теплогенератора (разработка NESTRO).

В системных комплексах, используемых европейскими производителями, очень высок уровень автоматизации всего технологического процесса. В технологии производства брикетов, пеллет важен контроль влажности исходного сырья перед прессованием. Определенный интерес представляют приборы измерения данного параметра, основанные на датчике контроля количества выбрасываемой влаги в атмосферу (разработчик Rittal-Das Systems). Разница общей массы и массы испаренной влаги дает показания оставшейся влаги в сырье. Автоматизация процесса подачи количества сырья производится через весы, работающие в потоке, частотно-регулируемыми приводами (разработка компании SIEMENS). Датчики контроля влажности в потоке могут крепиться на кронштейнах над ленточным транспортером, либо на днище наклонных коробов (разработка компании FEMAG).

На существующих брикетных заводах РБ применяются наиболее экономичные, простые и, соответственно, надежные ленточные конвейеры, по которым торф влажностью до 50 % возможно транспортировать под углом наклона не более 22 градусов. Чтобы поднять на высоту, обеспечивающую последующее дробление и сепарацию торфа, требуются сооружения наклонной галереи, иногда соизмеримые с длиной всего корпуса брикетного цеха. Данный аспект значительно улучшается путем применения облегченных высокопрочных транспортерных прорезиненных лент с отлитыми скребками, позволяющими работать под углом наклона конвейера до 60 градусов (разработчик компания Vode Belting).

Результаты исследований

В условиях жесточайшей конкуренции на рынке энергоносителей проектировщики РУП «Белниитоппроект» совместно с учеными кафедры «Горные машины» факультета горного дела и инженерной экологии Белорусского национального технического университета работают над оптимизацией технологических процессов добычи и переработки торфа с учетом разработок европейских компаний.

Однако приобретение оборудования европейского производителя влияет на снижение положительного сальдо Республики Беларусь. Значительное снижение себестоимости торфяных брикетов, в первую очередь, возможно путем изменения традиционной технологии добычи торфа скреперами. Так, например, применение пневматической уборки торфяной крошки относится к периоду возникновения поверхностно-последойного способа добычи фрезерного торфа и основано на исследованиях ведущего ученого в области торфяной механики С.Г. Солопова [2]. Применение валового учета добычи фрезерного торфа в тоннах привело к незаслуженному исключению из практики пневматической уборки.

При пневматической уборке торфа вследствие отсутствия подфрезеровывания торфяной залежи исключается увлажнение фрезерной крошки. Регулирование скорости

воздуха во входном отверстии сопла и изменение поступательной скорости пневмоуборочной машины позволяют подобрать такой режим работы, при котором обеспечивается выборочная уборка частиц измельченного торфа определенной влажности и крупности. Фракционный состав торфа при пневматической уборке более однороден, в нем почти отсутствуют посторонние включения, а сыпучесть существенно улучшается [3].

Исследования, проведенные в разное время развития торфяной промышленности, показали, что направленное перемещение измельченного торфа под воздействием газового потока может обеспечить высокие технико-экономические показатели процесса и, что особенно важно, заданное качество продуктов переработки торфяного сырья, а также значительное уменьшение его потерь. Однако указанный способ мало используется при добыче и переработке торфа. Это можно объяснить недостаточной изученностью процесса, недостатком опыта эксплуатации нового оборудования и отсутствием инженерных методик расчета оптимальных режимов работы различных систем пневмотранспорта торфа. Так, например, в ряде случаев режимы работы пневмоуборочных машин устанавливаются без необходимого обоснования: не всегда учитывается характер изменения размерно-плотностных и аэродинамических свойств измельченного торфа, микропрофиль поверхности поля сушки и рабочие характеристики воздушодувных машин. В итоге это обуславливает низкие цикловые и сезонные сборы торфа [4].

Применяемый ранее для уборки торфа пневматический комбайн КПФ-6,4 имеет расчетную производительность $V_{\max} = 30$ тыс. т фрезерного торфа за сезон, а БПФ-3М – 13 тыс. т (при влажности 40 %, зольности 23 %). Однако, из-за некоторых неровностей поверхности расстила при движении происходила деформация сопел пневмоуборочных машин, что увеличивало эксплуатационные затраты, простои на ремонт и снижало их фактическую производительность до 30 %. Для увеличения производительности и сохранения постоянных параметров пониженной влажности убираемого торфа (в среднем до 24 %), необходимо обеспечить регулировку высоты всасывающих сопел через опорные катки, копирующие поверхность расстила, т.е. усовершенствовать конструкцию комбайна. Это позволит оптимально использовать метеорологические условия сезона и увеличить сезонный сбор торфа с гектара.

В современных условиях бережного отношения к энергоносителям вести учет и сравнение способов добытого топлива только в тоннах не совсем корректно. Государственной программой «Торф» на 2008-2010 годы и на период до 2020 года, утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 23.01.2008 г. № 94, поставлена задача внедрения новых и совершенствование существующих технологий для добычи, переработки и использования торфа.

Для этой цели рассмотрим два способа уборки фрезерного торфа: существующий, наиболее используемый в настоящее время механический скреперный способ машинами типа УМПФ-8, и пневмоуборочный способ самоходными комбайнами КПФ-6,4 с усовершенствованными всасывающими соплами.

Необходимо отметить, что при механической уборке влажность добытого торфа достигает 40-50 %, а при пневмоуборке диапазон влажности составляет 18-30 %.

Для расчета состава твердого топлива с одной массы на другую пользуются множителями (коэффициент влажности K_w , коэффициент зольности K_A). Для упрощения расчетов значение параметра зольности условно примем 14 % [5]:

- при влажности 24 %

$$K_w = \frac{100 - W_p^2}{100 - W_p^1} = \frac{100 - 40}{100 - 24} = 0,789; \quad (1)$$

- при зольности 14 %

$$K_A = \frac{100 - A_p^2}{100 - A_p^1} = \frac{100 - 23}{100 - 14} = 0,895, \quad (2)$$

где W_p^2 – условная влажность торфа, %;

W_p^1 – средняя влажность добытого при пневмоуборке торфа, %;

A_p^2 – максимально допустимая зольность, %;

A_p^1 – средняя зольность торфа, %.

При достижении фактической средней влажности 24 %, средней зольности 14 %, конкретную добычу пневмоуборочным комбайном КПФ-6,4 (в тоннах за сезон) определяем по формуле [5]:

$$B_{\text{конкр}}^{\text{кпф}} = B_{\text{расч}}^{\text{кпф}} K_W K_A. \quad (3)$$

Таким образом,

$$B_{\text{конкр}}^{\text{кпф}} = 30\,000 \times 0,789 \times 0,895 = 21\,185 \text{ т/сезон.}$$

Добыча торфа механическим способом УМПФ-8 в тоннах за сезон при фактической средней влажности 45 % и зольности 14 % составит:

$$B_{\text{конкр}}^{\text{умпф}} = B_{\text{расч}}^{\text{умпф}} K_W K_A = 25\,000 \times 1,09 \times 0,895 = 24\,389 \text{ т/сезон,}$$

где $K_W = \frac{100 - W_p^2}{100 - W_p^1} = \frac{100 - 40}{100 - 45} = 1,09.$

Таким образом, на первый взгляд, производительность одной машины за сезон механическим способом в 1,15 раза выше, чем пневматическим.

На самом деле ситуация выглядит несколько по-иному. Для уточнения реальной объективной картины произведем расчет производительности уборочных машин в тоннах условного топлива.

Низшая рабочая теплота сгорания фрезерного торфа Q_n^p зависит от низшей теплоты сгорания горючей массы, а также от влажности и зольности добываемого топлива и определяется по формуле [5]:

$$Q_n^p = Q_n^r \frac{100 - w - A}{100} - 25w, \text{ кДж/кг}, \quad (4)$$

где Q_n^r – низшая теплота сгорания горючей массы (для торфа 22900 кДж/кг [5]);

w – влажность торфа, %;

A – зольность торфа, %.

Определим теплоту сгорания фрезерного торфа, соответственно, при влажности 45 %, 24 % и условно принятой средней зольности 14 %:

$$Q_n^p = 22900 \frac{100 - 45 - 14}{100} - 25 \times 45 = 8264 \text{ кДж/кг}, \quad (5)$$

$$Q_n^p = 22900 \frac{100 - 24 - 14}{100} - 25 \times 24 = 13598 \text{ кДж/кг.}$$

Для пересчета количества конкретного топлива ($B_{\text{конкр}}$) в условное ($B_{\text{усл}}$) и обратно пользуются тепловым эквивалентом по формуле [5]:

$$\mathcal{E} = \frac{Q_n^p}{29309}, \text{ или } \mathcal{E} = \frac{Q_n^p}{7000}, \quad (6)$$

где Q_n^p – теплота сгорания конкретного топлива, кДж/кг (или ккал/кг).

При этом

$$B_{\text{усл}} = B_{\text{конкр}} \mathcal{E}. \quad (7)$$

Определяем тепловой эквивалент фрезерного торфа, убранного механическим и, соответственно, пневматическим способом:

- при влажности 45 %

$$\mathcal{E} = \frac{8264}{29309} = 0,282;$$

$$B_{\text{усл}}^{\text{умпф}} = B_{\text{конкр}} \mathcal{E} = 24389 \times 0,282 = 6877 \text{ т у.т.};$$

- при влажности 24 %

$$\mathcal{E} = \frac{13598}{29309} = 0,464;$$

$$B_{\text{усл}}^{\text{кпф}} = 21185 \times 0,464 = 9830 \text{ т у.т.}$$

$$K_{\text{опереж}} = \frac{B_{\text{усл}}^{\text{кпф}}}{B_{\text{усл}}^{\text{умпф}}} = \frac{9830}{6877} = 1,43. \quad (8)$$

Таким образом, максимальная производительность в тоннах условного топлива, убранного фрезерного торфа пневматическим способом, в 1,43 раза выше, чем механическим.

Из-за дефицита площадей добычи некоторые предприятия торфяной промышленности Беларуси все чаще вынуждены осваивать мелкоконтурные залежи торфа. Строительство стационарных новых заводов в таких условиях экономически не целесообразно, так как срок окупаемости таких проектов свыше 20 лет. С учетом некоторых наработок применения модульного мини-брикетного завода (РБК «Владимир», Россия), основной особенностью которого является отсутствие капитальных зданий и сооружений, благодаря усовершенствованным пневмоуборочным комбайнам, появляется возможность строительства модульных мини-брикетных заводов без устройства теплогенераторов и сушилок.

При всех равных параметрах теплота сгорания торфяного топлива не зависит от его плотности, а лишь от его влажности и зольности. Для получения сравнительных характеристик определим теплоту сгорания торфяных брикетов при влажности до 20 %, зольности 14 % и годовую производительность в тоннах условного топлива:

$$Q_n^p = 22900 \frac{100 - 20 - 14}{100} - 25 \times 20 = 14614 \text{ Дж/кг},$$

$$\Theta = \frac{14614}{29309} = 0,5.$$

Соответственно, годовая производительность:

$$B_{\text{усл}}^{\text{брик}} = B_{\text{конкр}} \Theta = 20000 \times 0,5 = 10000 \text{ т у.т.}$$

$$Q_n^p = 22900 \frac{100 - 40 - 14}{100} - 25 \times 40 = 9534 \text{ Дж/кг}.$$

Определяем удельный расход торфа условной 40 % влажности для сжигания в теплогенераторе, используемого на сушку фрезерного торфа до требуемой влажности брикетов, в тоннах условного топлива [5]:

$$G_{\text{усл}}^{\text{сушки}} = G_{\text{конкр}} \Theta = 6658 \times 0,325 = 2164 \text{ т у.т./год},$$

где $G_{\text{конкр}}$ – расход торфа на сушку, т/год, (определено по [6]);

$\Theta = 0,325$ (определено по выражению (6) при влажности 40 %).

Данные расчеты показывают экономию сырьевых запасов торфа, из которых будет дополнительно получен брикет в количестве до 22 % с одного месторождения, что увеличит, соответственно, срок эксплуатации завода и значительно снизит себестоимость продукции.

При механическом способе уборки торфа для обеспечения максимальной производительности брикетного завода мощностью 20 тыс. т, необходимо добыть и обеспечить перевозку на завод $M^{40} = 36,4$ тыс. т фрезерного торфа (40 % влажности) [6]. Определим количество воды (негорючего вещества), испаренной при дополнительной сушке торфа на заводе до влажности 20 % по формуле (1) и (3):

$$M_{\text{воды}} = M^{40} - M^{20} = 36,4 - 27,3 = 9,1 \text{ тыс. т/год},$$

где $M^{20} = M^{40} \times K_{\text{п}} = 36,4 \times 0,75 = 27,3$ – масса фрезерного торфа при влажности 20 %;

$K_{\text{п}} = 0,75$ – переводной коэффициент из 40 % влажности на 20 % по формуле (1).

При этом необходимо отметить, что при пневматическом способе добычи торфа нет необходимости затрачивать энергию на перевозку и испарение этой лишней воды на заводе, так как ее испарение обеспечивается в естественных условиях сушки (18÷30 % влажности) солнечной энергией на полях добычи за счет увеличения цикловых сборов тонкими равномерными слоями. Темный цвет торфяной залежи, на которой сфрезерована торфяная крошка тонким слоем, работает по типу солнечных батарей, накапливая тепло и максимально направляя его на удаление влаги из фрезерного торфа.

Следует подчеркнуть, многолетний опыт эксплуатации пневмоуборочных машин показал, что используемые ранее самоходные машины типа КПФ-6,4 металлоемкие и требовали очень ровных поверхностей уборочных карт, а иногда выходили из строя по причине деформации каркасов металлических сопел при движении по неровной поверхности.

Эти недостатки пневматического способа уборки торфа снижали производительность до 30 %, что значительно повлияло на отказ от использования этого способа в больших масштабах.

Для исключения потерь по причине поломок предлагается изменить конструктивно крепление всасывающих сопел самоходного комбайна. Для этого по горизонтали сопла дополнительно оборудуются опорными колесами, соединенными с плавающей сварной конструкцией, прикрепленной шарнирно к раме машины. В итоге соединение сопел с верхними воздуховодами по вертикали посредством резиновой гофры позволит им иметь 4 степени свободы, что полностью исключит отказы из-за деформации и обеспечит номинальную производительность.

Преимущества производства торфобрикетов с уборкой фрезерного торфа из растила в штабели с одновременным фрезерованием залежи в сравнении с традиционным, скреперным способом на примере модульного мини-завода приведены в таблице.

Таблица – Сравнительная характеристика уборки фрезерного торфа для брикетирования на блочно-модульном мини-заводе

Показатели	Уборка фрезерного торфа из валков в штабели прицепной машиной УМПФ-8 (при условной влажности 40 %)	Уборка фрезерного торфа из растила в штабели с одновременным фрезерованием залежи пневматическим комбайном КПФ-6,4
	Модульный мини-завод торфобрикетов с теплогенератором (Россия)	Модульный мини-завод торфобрикетов без теплогенератора
производительность уборочной машины за сезон, т у.т.	6877	9830
годовая производительность завода, тыс. т	20	20
годовая производительность завода, тыс. т у.т.	10	9,28
потребность фрезерного торфа на годовую мощность завода, тыс. т	36,4 (40 % влажности)	21 (24 % влажности) 26,6 (40 % влажности)
расход сырья на сушку, тыс. т/год (40 % влажности)	6,6	0
расход сырья на сушку, тыс. т у.т./год	2,164	0
стоимость оборудования мини-завода, млн. долларов	1,7	1,09
сырьевая база на 10 лет работы, т	364 000 (40 % влажности)	266 000 (40 % влажности)

Заключение

Разработка и внедрение в существующую технологию добычи усовершенствованного самоходного пневмоуборочного комбайна позволит добывать торф пониженной влажности. Фрезерный торф, добытый пневмоуборочными комбайнами, подлежит прессованию в брикеты без дополнительной подсушки. Этот аспект позволит эконо-

мать до 32 % торфа условной влажности 40 %, расходуемого на сжигание в котлах или топках при традиционном скреперном способе добычи и увеличить выход товарной продукции (торфобрикетов) на 22 %. Удаление влаги происходит более эффективно в естественных условиях за счет солнечной энергии.

Из-за дефицита площадей добычи некоторые предприятия торфяной промышленности Беларуси все чаще вынуждены осваивать мелкоконтурные залежи торфа. Строительство стационарных новых заводов в таких условиях экономически не целесообразно, так как срок окупаемости таких проектов свыше 20 лет. С учетом некоторых наработок применения модульного мини-брикетного завода (РБК «Владимир», Россия), основной особенностью которого является отсутствие зданий и сооружений, появляется возможность строительства модульных мини-брикетных заводов без устройства теплогенераторов. В общей стоимости всего модуля производительностью 20 тыс. т брикетов в год, теплогенераторы вместе с барабанными сушилками, блоком безопасности и подготовки теплоносителя составляют около 36 %. Новая схема брикетного производства без устройства сушилок с годовой мощностью 10-30 тыс. т позволит снизить себестоимость и повысить конкурентоспособность на отечественном и зарубежном рынках.

К 2020 году в торфяной промышленности Беларуси в случае пятидесятипроцентной замены парка уборочных машин УМПФ на КПФ, экономия сырья (влажность 40 %) составит около 320 тыс. т, из которого дополнительно можно произвести 240 тыс. т торфяных брикетов в год. Очевидна экономия тепловой и электрической энергии, снижение стоимости оборудования, эксплуатационных затрат, для определения количественных показателей которых требуются дополнительные исследования.

Список использованных источников

1. Торфяная промышленность СССР. – Ленинград: Недра, 1971. – 136 с.
2. По страницам полувековой истории торфяной промышленности (1917-1967 гг.). – Торфяная промышленность. – 1967. – № 2. – С. 41-46.
3. **Кислов, Н.В.** Пневмоуборка торфа из растила / Н.В. Кислов, В.И. Бакшинский. – Минск: Наука и техника, 1983. – 88 с.
4. **Кислов, Н.В.** Пневматический транспорт торфяного производства / Н.В. Кислов. – Минск, 1985. – 80 с.
5. **Юрнев, В.Н.** Теплотехнический справочник Т.1 / В.Н. Юрнев, П.Д. Лебедев. – Москва, 1975. – 116 с.
6. Нормы расхода сырья при производстве брикетов топливных на основе торфа и потерь торфа и торфяной продукции при хранении, погрузке и перевозках. – Министерство энергетики Республики Беларусь. – Минск, 2009. – 10 с.

Berezovski N.I., Boriseiko V.V.

Innovation energy- and resource saving technologies of peat briquettes production

The article presents the results of study of European experience in the sphere of loose material processing for power generation at the international exhibition «HANNOVER MESSE 2012». There are also stated the results of study of technologies and equipment of German manufacturers by Belarusian Chamber of Commerce and Industry. Native innovation energy- and resource saving technologies of peat fuel production are offered.

Поступила в редакцию 26.02.2014 г.

УДК 622.281.74.044

АНКЕРНАЯ КРЕПЬ ПЕРВОГО УРОВНЯ КРЕПЛЕНИЯ, ПРИГОДНАЯ ДЛЯ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЕЕ ОТДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ

Поляков А.Л., Мисников В.А., Лутович Е.А., Шафиков М.Г., Якубович Н.Н. (ЧУП «Институт горного дела», г. Солигорск, Беларусь)

Рассмотрены разработанные конструкции анкерной крепи первого уровня, приведены результаты лабораторных испытаний ее отдельных узлов и элементов.

Введение

В настоящее время на Старобинском месторождении калийных солей основным видом крепления подземных горных выработок является анкерная крепь двух типов [1]:

- крепь анкерная металлическая винтовая (КАМВ) – используется для крепления кровли горных выработок;
- крепь анкерная замковая (КАЗ) – используется для крепления элементов свода (так называемых козырьков) и боков горных выработок.

Постоянно возрастающий спрос на калийные удобрения требует увеличения производственной мощности рудников, что, в свою очередь, невозможно без повышения производительности работ по креплению горных выработок.

Для повышения производительности работ по креплению горных выработок рудников ОАО «Беларуськалий» были применены анкероустановщики польского (WLK-2) и российского (МВК) производства.

Применение машин WLK-2 и МВК позволило существенно повысить производительность установки крепи КАМВ, но не решило вопрос механизации возведения крепи КАЗ, поскольку конструкция данной крепи не позволяет механизировать ее установку. Для решения данного вопроса специалистами ЧУП «Институт горного дела» были разработаны новые конструкции анкерной крепи, обладающей деформационно-силовыми характеристиками крепи КАЗ, но отличающейся от последней возможностью механизации ее установки.

Разработанная крепь на рудниках ОАО «Беларуськалий» ранее не применялась, поэтому потребовалось провести испытания грузонесущих характеристик ее отдельных узлов и элементов. По результатам испытаний для дальнейших исследований были отобраны три модификации крепи [2]:

- крепь комбинированная анкерная с винтовым замком (ККАВ-01);
- крепь комбинированная анкерная с винтовым замком и узлом податливости, модификация 1 (ККАВ-01п);
- крепь комбинированная анкерная с винтовым замком и узлом податливости, модификация 2 (ККАВ-02п).

Об особенностях и испытаниях данных конструкций далее в статье.

Общее описание конструкции разработанной анкерной крепи

Все три модификации разработанной крепи имеют в своей конструкции схожие элементы – это винтовой замок (отрезок крепи КАМВ), длина которого достигает

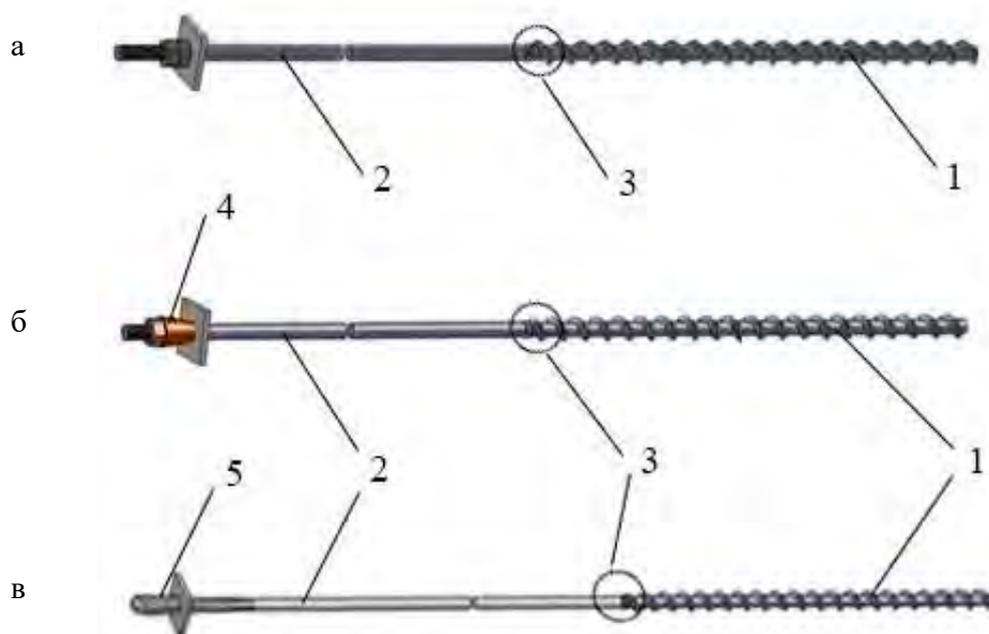
600 мм, и тело анкера из круглой стали $\text{Ø}20$ мм (отрезок крепи КАЗ). Оба отрезка соединены между собой с помощью сварки. Длина анкера может изменяться в пределах $0,9 \div 2,0$ м. Отличаются модификации разработанной крепи лишь видом и назначением опорных конструкций.

Крепь ККАВ-01 имеет опорную конструкцию как у крепи КАЗ (рисунок 1а), т.е. стандартная опорная плитка подхватывается снизу гайкой М 20, вторая гайка служит контргайкой при завинчивании анкера и после его установки может быть снята [2].

Крепь ККАВ-01п имеет в составе опорной конструкции усеченный конус (пуансон) с конусностью 6° (рисунок 1б), который призван создавать некоторую податливость при взаимодействии с опорной плиткой [2].

Опорная конструкция крепи ККАВ-02п представляет собой клиновидный пуансон анкера КАЗ (рисунок 1в), взаимодействующий с опорной плиткой и обеспечивающий таким образом некоторую податливость [2].

В двух последних модификациях разработанной крепи опорная плитка может иметь выпуклую (полусферическую или конусообразную) форму.



1 – винтовой замок; 2 – несущий стержень анкера из круглой стали $\text{Ø}20$ мм;
3 – сварное соединение; 4 – конусный пуансон; 5 – клиновидный пуансон

Рисунок 1 – Крепь комбинированная анкерная с винтовым замком (и узлом податливости): а – ККАВ-01; б – ККАВ-01п; в – ККАВ-02п

Лабораторные испытания образцов контрольных сварных соединений на сопротивление растяжению

Данные испытания были проведены в соответствии с методикой определения механических свойств сварных соединений (ГОСТ 6996-66). Для испытаний было изготовлено пять образцов. Сварка выполнялась в ручном режиме с использованием электродов УОНИ 13/55. Испытания проводились на разрывной машине ИР-200 [3].

При испытаниях фиксировались величина растягивающего усилия (кН) и величина деформации образцов (мм), после чего строились графики, приведенные на рисунке 2.

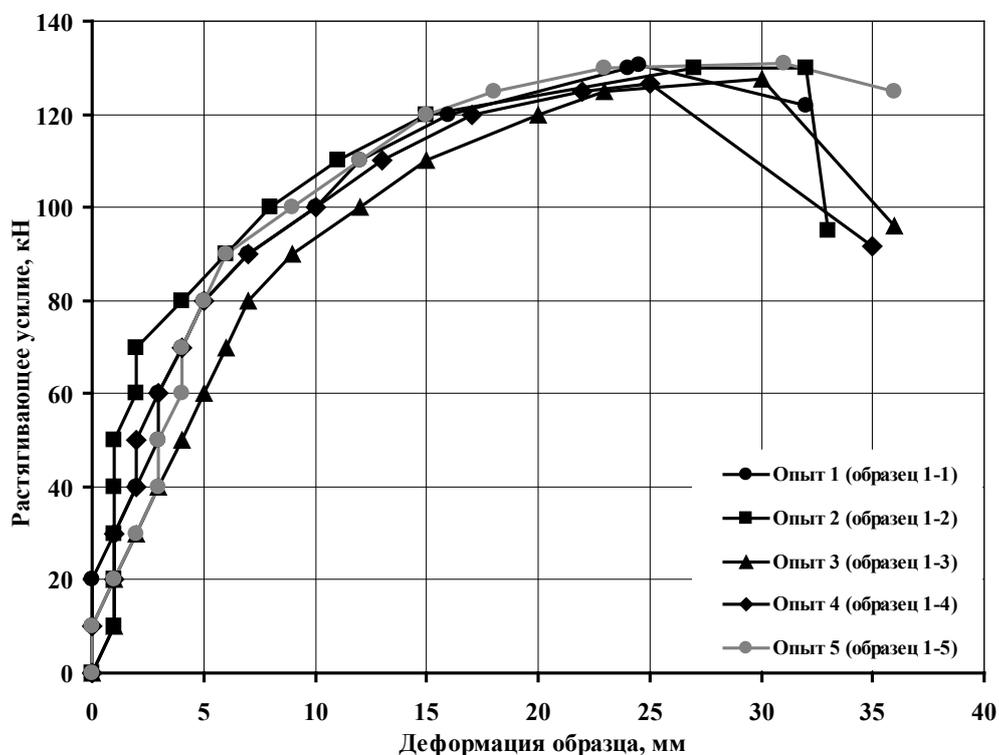


Рисунок 2 – Графики испытаний образцов контрольных сварных соединений на сопротивление растяжению

Нагружение образцов производилось до момента их полного разрушения (разрыва), характер разрушения образцов представлен на рисунке 3.

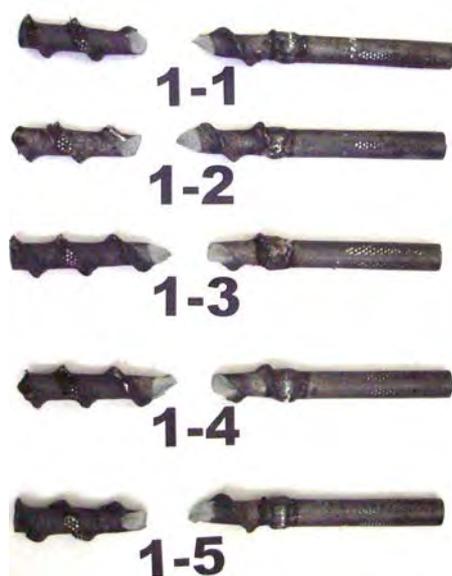


Рисунок 3 – Характер разрушения образцов контрольных сварных соединений

В результате анализа результатов проведенных испытаний было установлено следующее:

- разрушение образцов происходило на расстоянии от 20 до 50 мм от сварного шва;

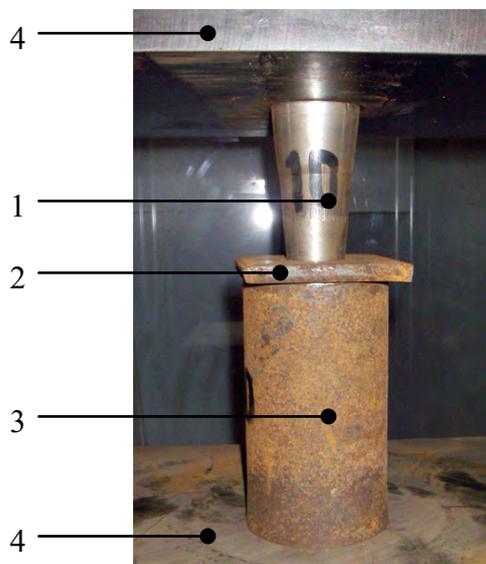
- во всех пяти опытах разрушался стержень винта, что вполне объяснимо, т.к. он имеет меньший диаметр (19 мм);

- максимальные зафиксированные величины растягивающего усилия составили $126,5 \div 131,0$ кН, при среднем значении 129,1 кН.

Величина рассчитанного по полученным результатам временного сопротивления растяжению (σ_B) составила 409,8 МПа. Данное значение лежит в допустимых для стали марки Ст. 3 пределах ($\sigma_{Bспр} = 380 \div 490$ МПа), отсюда следует, что испытываемое сварное соединение имеет деформационно-силовые характеристики, присущие конструкциям из данной стали.

Лабораторные испытания узла податливости крепи ККАВ-01п

Данные испытания проводились на машине для испытаний на сжатие ИП-1А-500 (рисунок 4). Испытываемый узел (конусный пуансон и опорная плитка) устанавливался в имитатор шпура (отрезок стальной трубы с внутренним диаметром 44,0 мм), затем производилось одноосное нагружение данной конструкции до разрушения одного из элементов [3].



1 – конусный пуансон; 2 – опорная плитка; 3 – имитатор шпура; 4 – опорные плиты пресса

Рисунок 4 – Схема испытаний силового взаимодействия конусного пуансона с опорными плитками

Таким образом, было испытано три конструкции узла податливости с конусным пуансоном в комбинации с различными опорными плитками (плоской, выпуклой полу-сферической и выпуклой конусообразной). Графики силового взаимодействия конусного пуансона с различными опорными плитками приведены на рисунке 5.

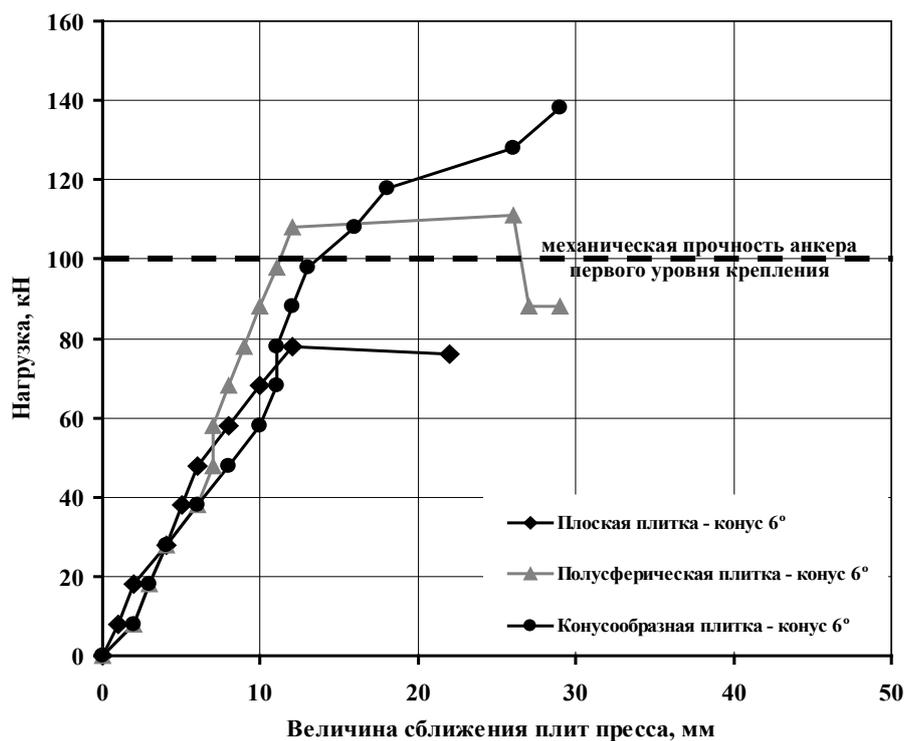


Рисунок 5 – Графики силового взаимодействия конусного пуансона с различными опорными плитками

В результате анализа результатов проведенных испытаний было установлено следующее:

- величина отпора при взаимодействии конусного пуансона с плоской опорной плиткой составила 76 кН, при податливости равной 22 мм;
- величина отпора при взаимодействии конусного пуансона с полусферической опорной плиткой составила 111 кН, при податливости равной 26 мм;
- величина отпора при взаимодействии конусного пуансона с конусообразной опорной плиткой составил 138 кН, при податливости равной 29 мм;
- при сравнении полученных деформационно-силовых характеристик с механической прочностью стержня анкеров первого уровня крепления (100 кН) следует отметить, что наиболее оптимальный характер взаимодействия у конусного пуансона с полусферической опорной плиткой.

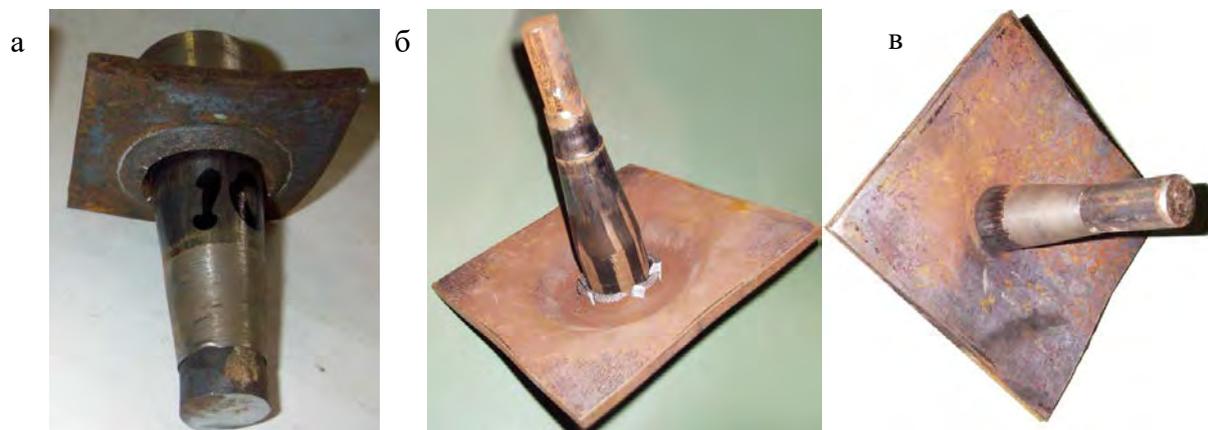
Вид узлов податливости после испытаний приведен на рисунке 6.

Лабораторные испытания узла податливости крепи ККАВ-02п

В данном случае были проведены испытания взаимодействия клинового пуансона с опорными плитками выпуклой формы [3]. Испытания проводились по схеме, представленной на рисунке 7. Для испытаний был взят анкер КАЗ длиной 1,5 м. Его стержень был использован в качестве тяги, а замковая часть являлась клиновым пуансоном. Нагрузка на испытываемую пару создавалась с помощью домкрата, при этом происходило протягивание пуансона через опорную плитку.

Всего было поставлено два опыта: в одном из них испытывалось силовое взаимодействие клинового пуансона с конусообразной опорной плиткой, во втором – с полусферической. Следует заметить, что кроме формы выпуклой поверхности, плитки отличались размерами внутренних отверстий. Так, у конусообразной плитки отверстие

было 29,0 мм, а у полусферической – 26,0 мм. Графики силового взаимодействия клинового пуансона с опорными плитками выпуклой формы приведены на рисунке 8, вид узлов податливости после испытаний – на рисунке 9.



а – плоская; б – полусферическая; в – конусообразная

Рисунок 6 – Результаты силового взаимодействия конусного пуансона с опорными плитками различной формы



1 – опорная плитка; 2 – клиновой пуансон; 3 – домкрат ДП30Г210

Рисунок 7 – Схема испытаний силового взаимодействия конусного пуансона с опорными плитками выпуклой формы

В результате анализа результатов испытаний было установлено следующее:

- максимальный отпор при взаимодействии клинового пуансона с конусообразной опорной плиткой составил 67 кН при податливости равной 115 мм. Как видно из графика, нагружение происходило плавно и без срывов, пуансон фактически скользил с усилием 67 кН по краям плитки, прорезая себе путь до момента выхода из контакта;
- максимальный отпор при взаимодействии клинового пуансона с полусферической опорной плиткой составил 86 кН при податливости равной 82 мм. Нагружение происходило плавно, но при усилении 55 кН произошел срыв нагрузки до 41 кН. Визуально было установлено, что пуансон нагружался несимметрично, что выражалось в его изгибании, при достижении максимальной величины нагружения (86 кН) произошел обрыв пуансона в месте контакта с плиткой.

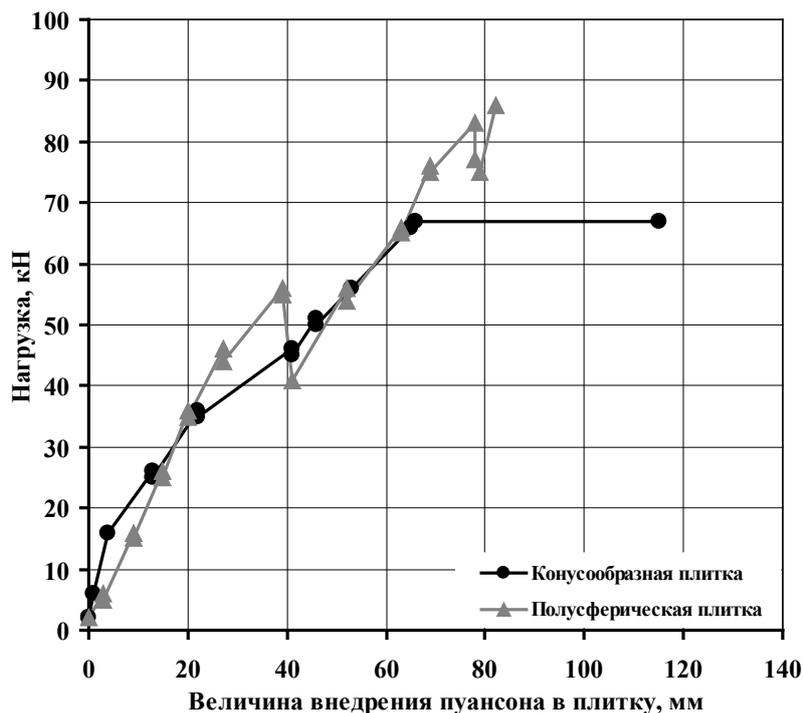


Рисунок 8 – Графики силового взаимодействия клинового пунсона с опорными плитками выпуклой формы



Рисунок 9 – Вид узлов податливости после испытаний

Выводы

Разработанная комбинированная анкерная крепь имеет конструкцию, позволяющую механизировать процесс ее возведения с помощью используемых на рудниках ОАО «Беларуськалий» анкероустановщиков WLK-2 и MBK.

Проведенные лабораторные испытания позволили обосновать возможность использования сварного соединения винтового замка (отрезка крепи КАМВ) и тела анкера из круглой стали $\varnothing 20$ мм (отрезка крепи КАЗ) для их дальнейшего применения в качестве комбинированной анкерной крепи первого уровня крепления.

Также в ходе испытаний были получены деформационно-силовые характеристики различных вариантов узла податливости данной крепи.

На основании сравнительного анализа данных, полученных в результате проведенных испытаний, предлагаемые конструкции анкерной крепи были признаны перспективными с точки зрения изготовления опытной партии и последующего испытания в шахтных условиях.

Список использованных источников

1. Инструкция по охране и креплению горных выработок на Старобинском месторождении. – Солигорск-Минск, 2010. – 125 с.

2. Разработать и испытать анкерную крепь длиной до 2,0 м, обладающую деформационно-силовыми характеристиками крепи КАЗ и пригодную для механизированной установки в подземных условиях, выполнить эскизную проработку конструкции крепи, изучить технические возможности применяющихся на рудниках ОАО «Беларуськалий» средств механизации крепления горных выработок и разработать приспособления (адаптеры) для установки предлагаемой конструкции: отчет о НИР (промежуточ. по дог. № 02/10, этап 5,1) / ЧУП «Институт горного дела»; рук. А.Л. Поляков; исполн. Мисников В.А. [и др.]. – Солигорск, 2012. – 39 с. – № ГР 20101033. – Инв. № 126.

3. Разработать и испытать анкерную крепь длиной до 2,0 м, обладающую деформационно-силовыми характеристиками крепи КАЗ и пригодную для механизированной установки в подземных условиях, провести лабораторные испытания грузонесущих характеристик отдельных элементов разработанной крепи: отчет о НИР (промежуточ. по дог. № 02/10, этап 5,2) / ЧУП «Институт горного дела»; рук. А.Л. Поляков; исполн. Мисников В.А. [и др.]. – Солигорск, 2012. – 39 с. – № ГР 20101033. – Инв. № 128.

Polyakov A.L., Misnikov V.A., Lutovich E.A., Shafikov M.G., Jakubovich N.N.

Roof bolting of the first level of support applicable to the powered installation. Laboratory tests of its individual units and elements

The developed constructions of roof bolting of the first level are considered. The laboratory test results of its individual units and elements are presented.

Поступила в редакцию 27.02.2014 г.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.83.06: 622.23.05

**ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ
ДЛЯ РАБОТЫ В СКВАЖИНАХ**

Лустенков М.Е. (ГУВПО «Белорусско-Российский университет», г. Могилев, Беларусь)

В статье обосновывается выбор типа механической передачи для работы в пространствах с ограниченными радиальными габаритами. Приводятся требования, предъявляемые к указанным передачам. Разработан критерий сравнительной оценки: мощность, передаваемая на единицу площади поперечного сечения передачи. Проведен сравнительный анализ малогабаритных соосных редукторов ведущих мировых производителей. По результатам анализа предложены для использования передачи с составными промежуточными телами качения.

Введение и постановка задач исследования

В инженерной практике часто необходимо использовать механическую передачу (в составе приводов устройств, машин) для передачи мощности в пространства с малыми радиальными габаритами. Примерами являются механизмы для осуществления силовых воздействий в труднодоступных местах, применяемые аварийно-спасательными подразделениями МЧС, передачи, встраиваемые в корпуса трубчатой формы гайковертов и баллонных ключей, с увеличением крутящего момента. В ограниченные пространства с малыми радиальными размерами встраиваются механизмы дифференциалов транспортных средств, так как эти размеры с учетом габаритов главной передачи влияют на профильную проходимость. Компактными должны быть редукторные узлы, встраиваемые в кинематические цепи роботов и манипуляторов.

Основной стратегической сферой применения таких механизмов является геологоразведочное бурение, техническое обслуживание и ремонт скважин. Малые радиальные габариты должны иметь редукторные вставки электробуров и турбобуров, приводы ловильных устройств, применяемых для ликвидации аварий и извлечения колонны труб из скважины, приводы погружных насосов, скважинных приборов и т.д.

Для замедления темпов закономерного падения уровня нефтедобычи (до 20 тонн ежегодно) в связи с выработкой запасов на месторождениях, в Республике Беларусь реализуется программа по внедрению новых технологий в области бурения и разработки залежей нефти и газа, которая предусматривает добычу нефти в 2015 году в объеме не менее 1,6 млн. т. Согласно указанной программе в период 2011-2015 годы планируется прорубить около 160 новых скважин, более 90 вторых стволов, произвести свыше 100 скважино-операций по переходу на вышележащий интервал и другой горизонт [1]. Для реализации перспективного направления, связанного с поиском залежей нефти на больших глубинах (от 1,5 до 7 км), проводится комплекс мероприятий по техническому и технологическому переоснащению геологоразведочных работ [2]. Одним из способов

повышения дебита скважин и коэффициента извлечения нефти из пластов является вскрытие продуктивных горизонтов горизонтальными и горизонтально-разветвленными стволами. При этом наиболее оптимальным и рациональным способом бурения является электробурение. Применение электробуров позволяет бурить наклонно направленные скважины в сочетании с телеметрическими системами в сложных геологических условиях [3]. Электробуром бурят практически при постоянной скорости вращения долота и бурильщик не имеет возможности ее регулировать. Изменять скорость вращения можно при помощи редукторов-вставок [4].

Согласно Межгосударственному стандарту ГОСТ 15880-96 «Электробуры. Общие технические условия» наружные диаметры электробуров находятся в диапазоне от 127 до 290 мм, наиболее часто используемые – от 127 до 195 мм, передаточные отношения не превышают 10. При встраивании передачи в скважинные устройства, средства механизации, механизмы трансмиссий, роботов, манипуляторов, диаметральные габариты механических передач, как правило, не превышают 100 мм при передаточных отношениях от 1 до 12.

Целями данной работы являются сравнительный анализ механических передач различных типов, работающих в пространствах с ограниченными радиальными габаритами и обоснование выбора наиболее рационального типа передач.

Требования, предъявляемые к передачам, и критерий для их сравнения

Механические передачи, работающие в вышеуказанных условиях, должны иметь компоновочные преимущества и обеспечивать:

- высокую нагрузочную способность, способность выдерживать ударные нагрузки и кратковременные перегрузки;
- соосность осей ведущего и ведомого валов;
- работоспособность в условиях ограниченной смазки (консистентный смазочный материал закладывается при сборке);
- возможность проектирования сквозного центрального отверстия, иногда с диаметром D_0 до 40 % от D_{max} . Это требование актуально для приводных систем манипуляторов, а также для многих редукторов, работающих в скважинах (для прохода бурового раствора, промывочной жидкости, для размещения транзитных проводов и т.д.);
- расширенные кинематические возможности (возможность получения различных скоростей вращения путем торможения различных звеньев, работа в режиме дифференциала и др.).

Основным требованием является высокая нагрузочная способность, так как работа редукторов связана с передачей значительных мощностей при ограниченных габаритах. Для анализа передач разных типов необходимо определить сравнительный критерий, который бы учитывал энергоэффективность передачи и условия ее работы.

В [5] предлагается развернутая оценка различных видов передач (планетарного типа) по нескольким критериям (весу, крутящему моменту на выходном валу, передаваемой мощности), основным из которых принимается наименьшая сумма затрат на изготовление и годовых эксплуатационных затрат. Из-за нехватки исходных данных по всей линейке редукторных узлов, особенно производимых за рубежом, использовать данный критерий нецелесообразно. В [6] отмечается, что основной энергетической характеристикой редуктора является допустимый крутящий момент на тихоходном валу редуктора при постоянной нагрузке и числе циклов лимитирующего зубчатого колеса, равном его базе контактных напряжений (номинальный момент). Критерием техниче-

ского уровня редуктора служит относительная масса (масса, деленная на передаваемый крутящий момент). У редукторов высшего уровня, соответствующего «рекордным образцам», этот показатель составляет менее 0,06, у редукторов высокого уровня находится в диапазоне 0,06-0,1. Основным общим критерием технического уровня редукторов, по мнению авторов [7], является отношение массы редуктора к допустимому моменту на его тихоходном валу, причем у редукторов основных типов он составляет 0,03...0,05 кг/Нм и имеет тенденцию снижения.

Для оценки радиально малогабаритных передач был предложен критерий, определяемый как отношение крутящего момента на ведомом валу к максимальному диаметру корпуса передачи [8]. Однако данный показатель не учитывает величины угловых скоростей вращения валов, которые могут у разных передач различаться на порядок.

Наиболее полно технический уровень механической передачи, соответствующей указанным требованиям, будет отражать параметр k_{ps} , кВт/м²:

$$k_{ps} = \frac{P}{S} = \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot (D_{\max}^2 - D_0^2)}, \quad (1)$$

где P – номинальная передаваемая мощность, определенная с учетом номинальных значений крутящих моментов и угловых скоростей валов, кВт;

S – максимальная площадь поперечного сечения передачи, м²;

D_{\max} – максимальный диаметр корпуса передачи, м;

D_0 – диаметр сквозного отверстия в передаче (при его наличии), м.

Сравнительный анализ радиально малогабаритных механических передач

Исследуем применимость в указанных условиях механических передач известных типов с учетом критерия k_{ps} . Критериям радиальной малогабаритности и высокой нагрузочной способности отвечают серводвигатели, параметры которых также необходимо проанализировать.

Наиболее распространенными и часто применяемыми являются планетарные зубчатые передачи, нагрузка в которых распределяется по потокам (сателлитам). Они могут образовывать соосные механизмы (редукторные и дифференциальные). Повышение нагрузочной способности достигается применением косозубых колес, модификацией эвольвентного и использованием других видов зубчатых зацеплений (Новикова, циклоидального, квазивинтового и др.).

В настоящее время ресурсы повышения нагрузочной способности планетарных зубчатых передач конструктивными методами практически исчерпаны. Дальнейшее их совершенствование связано с применением новых смазочных материалов, материалов для изготовления деталей и новых видов их упрочнения. Передаточное отношение зубчатых планетарных передач зависит от их радиальных размеров. Они имеют ограниченные возможности проектирования сквозного отверстия и относительно невысокий коэффициент перекрытия, несмотря на многопоточность.

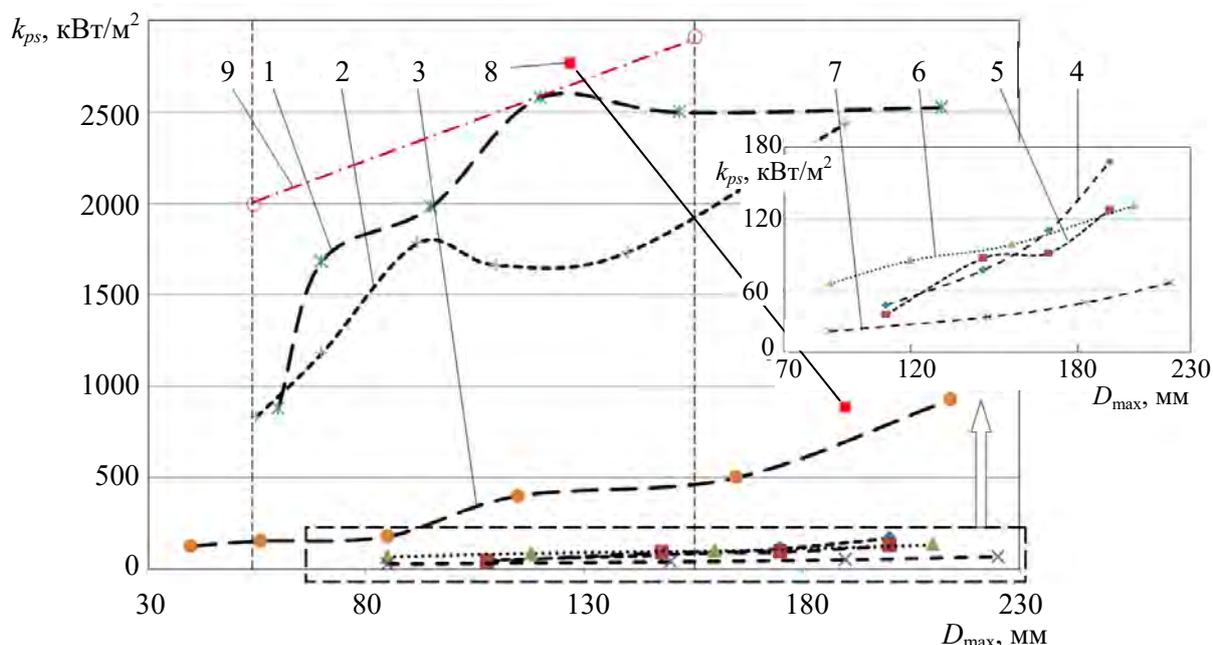
В США, Японии, Германии и других странах налажено серийное производство волновых редукторов общего назначения. В СССР они выпускались серийно с типоразмерами, начиная с 50,8 мм (диаметр делительной окружности гибкого элемента). В настоящее время одним из мировых лидеров является фирма Harmonic Drive AG (Германия), которая производит многоцелевые волновые редукторы, в том числе для космической и военной техники [9]. Недостатками волновых передач являются: не-

возможность реализации малых передаточных отношений, сложность в изготовлении гибкого звена (которое одновременно является слабым элементом передачи) и небольшие значения параметра k_{ps} . При максимальных диаметрах корпусов редукторов от 50 до 120 мм его значения составляют 15-42 кВт/м². Номинальные крутящие моменты волновых редукторов устанавливались производителем при частоте вращения ведущего вала 2000 об/мин, КПД при расчетах принимался равным 0,95, а диапазон передаточных отношений составлял 30-50.

Одним из наиболее перспективных типов механических передач являются планетарные цевочные передачи с циклоидальным зацеплением. Это разновидность планетарных зубчатых передач, сконструированных по схеме КН-V (по классификации В.Н. Кудрявцева). При этом вместо зубьев одного из колес используются цевки либо ролики, установленные на пальцы, а эвольвентный профиль зубьев заменен циклоидальным. Как отмечают многие специалисты, по показателям надежности, долговечности и компактности редукторы, созданные на основе цевочных передач, превосходят другие известные образцы редукторов как отечественного, так и зарубежного производства. Ранее существовавшие технологические трудности в изготовлении циклоидального профиля в настоящее время устранены вследствие появления обрабатывающих центров и станков с ЧПУ нового поколения. Однако планетарные цевочные передачи требуют высокой точности изготовления и сборки. В работе участвует лишь ограниченное число цевок, что снижает нагрузочную способность. В этих передачах сложно проектировать сквозное отверстие, необходимо решать вопрос уравнивания, так как сателлит размещается на эксцентрик. Конструкцию усложняет необходимость проектирования механизма съема движения с сателлита, совершающего плоскопараллельное движение.

Нами был проведен сравнительный анализ некоторых типов серийно выпускаемых редукторов с передачами, в той или иной степени удовлетворяющими указанным выше требованиям, по критерию k_{ps} , определяемому по формуле (1). Изучались геометрические параметры и технические характеристики редукторов и мотор-редукторов с диаметрами корпуса до 200 мм (диаметр фланца не учитывался), представленные ведущими мировыми производителями на официальных сайтах и в каталогах. Сравнивались характеристики одноступенчатых зубчатых планетарных редукторов (ПР) фирмы Apex Dynamics, Inc. (Тайвань) [10] и Harmonic Drive AG (Германия) [9]. Также исследовались характеристики планетарно-цевочных редукторов (ПЦР) и мотор-редукторов (МПЦР) с циклоидальным зацеплением НТЦ «Редуктор» (Санкт-Петербург, РФ) [11], TwinSpin фирмы Spinea (Словакия) [12], Sumitomo (Япония) [13], а также серводвигателей (СД) фирмы КЕВ (Германия) [14]. Ограниченность выборки обусловлена тем, что большинство производителей приводной техники (более 80 %) изготавливают редукторы с диаметром корпуса более 200 мм. Результаты сравнительного анализа приведены на рисунке.

Планетарно-цевочные редукторы и мотор-редукторы российского производства [11] имеют передаточное отношение, равное 9, в каталоге приводилась номинальная передаваемая мощность. У всех сравниваемых редукторов фирмы Sumitomo номинальная частота вращения ведущего вала n_1 принималась равной 1500 об/мин, КПД – 0,95. Определение параметра k_{ps} для планетарно-цевочных редукторов TwinSpin (Spinea) проводилось с использованием следующих характеристик: $n_1 = 2000$ об/мин, КПД – 0,95. Редукторы TwinSpin имеют сквозное отверстие с диаметром, составляющим 17-25 % от диаметра корпуса.



1 – ПР Apex Dynamics Inc.; 2 – СД КЕВ; 3 – ПР Harmonic Drive AG; 4 – ПЦР НТЦ «Редуктор»; 5 – МПЦР НТЦ «Редуктор»; 6 – ПЦР Sumitomo; 7 – ПЦР Spinea; 8 – «синусошариковые» редукторы-вставки; 9 – линия, определяющая значения k_{ps} для редукторов с мировым техническим уровнем

Рисунок – К сравнительному анализу малогабаритных редукторов ведущих мировых производителей

У фирмы Apex Dynamics сравнивался ряд планетарных зубчатых редукторов с передаточным отношением, равным 4. Их КПД по каталогу принимался 0,97. На большие расчетные значения параметра k_{ps} оказали влияние высокие заявленные номинальные частоты вращения входных валов (3000-5000 об/мин). Планетарные зубчатые редукторы фирмы Harmonic Drive AG изготавливались и собирались с учетом особенности центрального коронного колеса, имеющего высокую податливость, аналогично свойствам гибких элементов волновых передач, выпускаемых этой же фирмой. Сравниваемые редукторы Harmonic Drive AG имеют передаточное отношение, равное 5, КПД по каталогу принималось 0,97, номинальная частота вращения входного вала при расчетах критерия k_{ps} устанавливалась равной 3000 об/мин.

Наряду с механическими передачами, одним из перспективных видов электрических машин являются серводвигатели. Двигатели SM Servo Motors фирмы КЕВ имеют относительно высокую нагрузочную способность и малые радиальные габариты. Их недостатками являются безусловная необходимость обеспечения токоподвода и использования дополнительной редуцирующей ступени, так как частоты вращения их валов находятся в диапазоне от 3000 до 6000 об/мин.

Проведенный анализ не претендует на универсальность, так как сопоставляемые редукторы имели разные (хоть и близкие) значения передаточных отношений, косвенно учитывался ресурс, кроме этого многие характеристики в каталогах могли быть завышены производителями и продавцами в рекламных целях, однако он дает общие представления о технических характеристиках, к которым нужно стремиться при проектировании новой техники. На основе графиков, приведенных на рисунке, было установлено условие соответствия проектируемой передачи современному мировому уровню развития малогабаритной редукторной техники. Данное условие было получено для

передач с диаметрами корпуса от 50 до 150 мм, как уравнение прямой 9 (на рисунке), построенной по координатам двух ее точек:

$$k_{ps} \geq 9 \cdot D_{\max} + 1550. \quad (2)$$

Из условия (2) можно определить предельную мощность, которую должен передавать редуктор с высоким техническим уровнем, либо габариты, в которые он должен вписываться, при заданной передаваемой мощности.

В последнее время разработчики новой техники все чаще обращают внимание на передачи с промежуточными телами качения (ППТК) [15]. В них нагрузка передается посредством шариков (или роликов), перемещающихся по беговым дорожкам основных деталей. ППТК обладают высокой нагрузочной способностью и малыми габаритами, так как передача мощности осуществляется по множеству параллельных потоков (тел качения). В [16] приводятся данные по результатам промышленных испытаний «синусошариковых» редукторов-вставок электробуров с передаваемой мощностью 35 кВт и 25 кВт при диаметре корпуса 127 и 190 мм и передаточных числах 5 и 1,75 соответственно, что отражено маркерами на рисунке. При тяжелом режиме нагружения наработка на отказ электробуров составляла свыше 200 часов непрерывной работы. Работоспособность передач аналогичного типа подтверждена при создании привода скважинного прибора с диаметром корпуса 40 мм [17].

ППТК могут иметь высокую нагрузочную способность при использовании роликов в качестве тел качения и высокий КПД, при условии замены скольжения промежуточных тел их качением по соответствующим рабочим поверхностям элементов передачи. Это достигается применением составных роликов, каждый из элементов которого (две втулки и стержневая основа) имеет возможность относительного вращения и взаимодействует с соответствующей рабочей поверхностью основного элемента ППТК [18, 19].

Выводы

На основе сравнительного анализа соосных радиально малогабаритных механических передач было установлено, что для обеспечения конкурентоспособности проектируемой передачи на мировом уровне, критерий k_{ps} для редукторов с диаметром корпуса от 50 мм до 150 мм должен иметь значения не ниже $(2 \dots 2,9) \cdot 10^3$ кВт/м². При прочих равных условиях (применяемые материалы для изготовления деталей, их термообработка, смазка и т.д.) повышение нагрузочной способности редукторного узла при сохранении (или уменьшении) его радиальных габаритов можно обеспечить, увеличивая количество параллельных потоков в передаче мощности (многопоточность) и повышая КПД. Установлено, что потенциальными возможностями обеспечения требуемых значений критерия k_{ps} обладают передачи некоторых групп из класса ППТК с составными телами качения. Это вызывает необходимость дальнейшего исследования и совершенствования методик проектирования и расчета этих передач.

Список использованных источников

1. Программа освоения месторождений полезных ископаемых и развития минерально-сырьевой базы Республики Беларусь на 2011-2015 годы и на период до 2020 года.
2. Белорусская строительная газета [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://cnb.by/content/view/1705/68/lang,ru>.

3. **Фитцова, Е.С.** Редукторные вставки электробуров / Е.С. Фитцова // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и молодых ученых, Гомель, 26-27 апр. 2012 г. / ГГТУ им. П.О. Сухого. – Гомель, 2012. – С. 56-59.
4. **Вадецкий Ю.В.** Бурение нефтяных и газовых скважин: учебник / Ю.В. Вадецкий. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 352 с.
5. **Заблонский, К.И.** Встроенные редукторы / К.И. Заблонский, А.Е. Шустер. – Киев: Техника, 1969. – 176 с.
6. **Решетов, Д.Н.** Детали машин: учебник / Д.Н. Решетов. – 4-е изд. – М.: Машиностроение, 1989. – 496 с.
7. Проектирование механических передач: учеб. пособие / С.А. Чернавский [и др.]. – 7-е изд. – М.: ИНФРА-М, 2013. – 536 с.
8. **Сазонов, И.С.** Передачи для работы в условиях ограниченных радиальных габаритов / И.С. Сазонов, М.Е. Лустенков // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2013. – № 4 (41). – С. 85-94.
9. Harmonic Drive AG. Just Move It: General catalogue / Harmonic Drive AG., Germany. – 2011. – 528 p.
10. Planetary Gearboxes. High Precision. High Speed. AD, ADR, ADS Series: Catalogue / Apex Dynamics, Inc., Taiwan. – 2013. – 15 p.
11. Редукторы и мотор-редукторы планетарно-цевочные: каталог / НТЦ «Редуктор», Санкт-Петербург. – 2005. – 32 с.
12. TwinSpin H Series: Catalogue / Spinea, Inc., Slovakia. – 2012. – 13 p.
13. Servo. Compact low backlash gearboxes for positioning applications: Catalogue 669015 EN/DE / Sumitomo Driver Technologies, Japan. – 2010. – 58 p.
14. SM Servo Motors: Catalogue / KEB 00.00.000 – SDSM. – KEB: Germany, 2010. – 12 p.
15. **Лустенков, М.Е.** Передачи с промежуточными телами качения: определение и минимизация потерь мощности / М.Е. Лустенков. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2010. – 274 с.
16. **Игнатищев, Р.М.** Проблема создания надежных редукторов для скважин перестала быть научной / Р.М. Игнатищев // Нефтяное хозяйство. – 1990. – № 11. – С. 26-28.
17. **Лустенков, М.Е.** Редуцирующий узел скважинного прибора с планетарной шариковой передачей / М.Е. Лустенков // Горная механика. – 2008. – № 4. – С. 81-86.
18. Совершенствование конструкции передач с промежуточными телами качения // И.С. Сазонов [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2012. – № 1. – С. 74-83.
19. Исследование кинематики и определение КПД передач с промежуточными телами качения / М.Е. Лустенков [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2013. – № 2. – С. 77-89.

Lustenkov M.E.

Choice substantiation of mechanical transmissions working in the holes

The choice of mechanical transmissions type for work in the areas with the limited radial dimensions is studied in the article. The requirements to transmissions are suggested. The criterion of a comparative rating is developed: the rated power transferred to the unit of the cross-section area of the transmission. The comparative analysis of speed reducers of leading world manufacturers is carried out. The transmissions with compound intermediate rolling elements are offered.

Поступила в редакцию 21.02.2014.

УДК 622.232.72:629.369.017.2

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ КОМБАЙНОВ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

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

Данная статья посвящена исследованиям устойчивости комбайнов избирательного действия в зависимости от нагрузок на исполнительном органе. Проведен сравнительный анализ комбайнов с исполнительными органами, оснащенными одинарной осевой коронкой и двойной поперечной режущей коронкой.

Введение

Проходческий комбайн – сложная многоприводная горная машина, обеспечивающая выполнение большого числа основных и вспомогательных операций рабочих процессов проведения и крепления подготовительных выработок, предназначенная для механизированного разрушения горных пород, погрузки горной массы в транспортные средства (вагонетки, конвейер, перегружатель).

Комбайны избирательного действия предназначены для проведения выработок любой формы, кроме круглой. Их применение позволяет механизировать основные процессы проходческого цикла – разрушение горной породы, ее удаление из забоя выработки и погрузку на транспортные средства. Использование комбайнов избирательного действия позволяет совместить во времени основные, наиболее трудоемкие операции, что дает возможность повысить производительность труда и темпы проведения выработок, снизить стоимость проходческих работ и значительно обезопасить труд рабочих забоя в сравнении с буровзрывным способом. Кроме того, при комбайновом способе проведения существенно повышается устойчивость горных выработок, так как связанность пород в массиве нарушается в меньшей степени, чем при буровзрывных работах.

Исполнительный орган комбайнов избирательного действия при отработке забоя совершает качательные движения в горизонтальной и вертикальной плоскостях, постоянно контактируя с ним. Нагрузки, возникающие при этом, передаются стреле исполнительного органа и комбайну в целом. Колебания комбайна под действием вектора внешнего возмущения в зависимости от режима его работы, сопротивляемости горной массы разрушению и других факторов будут различными как по значению, так и по характеру. В зависимости от нагрузок и конструкции опорно-направляющих устройств комбайнов колебаться может либо исполнительный орган, либо – комбайн в целом.

Сравнительный анализ устойчивости комбайнов избирательного действия

Под устойчивостью горных комбайнов понимают способность последних сохранять в среднем заданное им в пространстве забоя положение в рабочем режиме, когда амплитуды колебаний комбайна в рассматриваемой плоскости относительно среднего заданного положения не превосходят допускаемых значений [1].

В связи с этим применительно к устойчивости комбайнов в забое введены понятия полной устойчивости, частичного и полного нарушения устойчивости комбайна.

Кроме того, для проходческих комбайнов различают продольную и поперечную устойчивость [2].

Полная устойчивость комбайна в забое – способность под действием нагрузки сохранять заданное положение, при котором исключаются отрыв опорных гусениц механизма подачи от почвы или наклон продольной оси комбайна относительно плоскости почвы выработки.

Частичное нарушение устойчивости комбайна в забое – состояние, когда под действием нагрузки возможен возвращаемый в исходное положение отрыв опорных гусениц от почвы.

Полное нарушение устойчивости комбайна – состояние, когда под действием нагрузки происходит невозвращаемый в исходное положение и прогрессирующий отрыв опорных гусениц от почвы.

Комбайны на гусеничном ходу подлежат проверке продольной и поперечной устойчивости.

Введем понятие коэффициента устойчивости.

$$k_y = \frac{M_{\text{восст}}}{M_{\text{опр}}}, \quad (1)$$

где $M_{\text{восст}}$, $M_{\text{опр}}$ – моменты сил соответственно восстанавливающих комбайн от опрокидывания и опрокидывающих комбайн.

Комбайн считается устойчивым при $k_y > 1,05$.

При проверке продольной устойчивости комбайна рассматривается два случая нагружения:

1. Комбайн работает вниз по уклону, разрушение забоя производится при движении стрелы исполнительного органа снизу вверх.

2. Комбайн работает вверх по уклону, разрушение забоя производится при движении стрелы исполнительного органа сверху вниз, одновременно исполнительный орган внедряется в забой гидроцилиндрами телескопа.

При проверке поперечной устойчивости комбайна рассматривается также два случая нагружения:

1. Исполнительный орган находится в крайнем правом или левом положении, разрушение забоя производится при движении стрелы снизу вверх.

2. Исполнительный орган находится в крайнем правом или левом положении, разрушение забоя производится при движении стрелы сверху вниз.

Сравнительный анализ произведем для комбайнов избирательного действия производства ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» КИД-220М и КПМ-40. Комбайны выполнены на одной базе, имеют сходную систему управления и гидравлическую систему. Различие их состоит в том, что в качестве рабочего органа комбайна КИД-220М используется одинарная аксиальная осевая коронка, комбайн КПМ-40 оснащается исполнительным органом с двойной аксиальной поперечной коронкой. Параметры исполнительных элементов передвижения (гидроцилиндров) в комбайнах идентичны. Параметры расчетных схем принимаются согласно [3].

Рассмотрим первый расчетный случай при проверке комбайна на продольную устойчивость.

Расчетная схема комбайна КИД-220М предоставлена на рисунке 1, КПМ-40 – на рисунке 2.

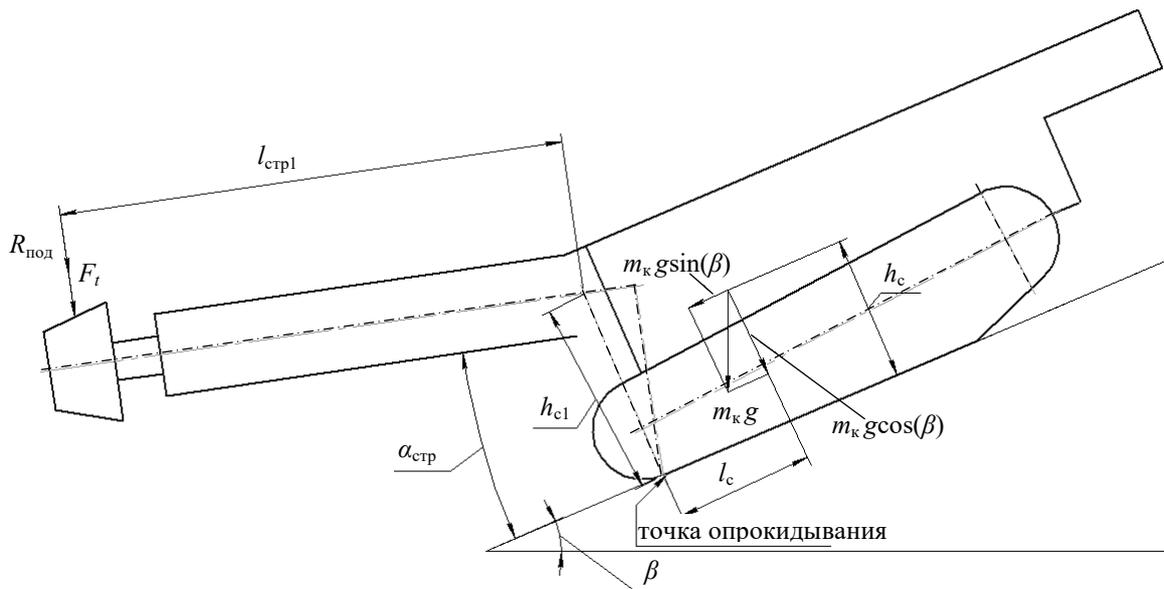


Рисунок 1 – Расчетная схема продольной устойчивости комбайна КИД-220М

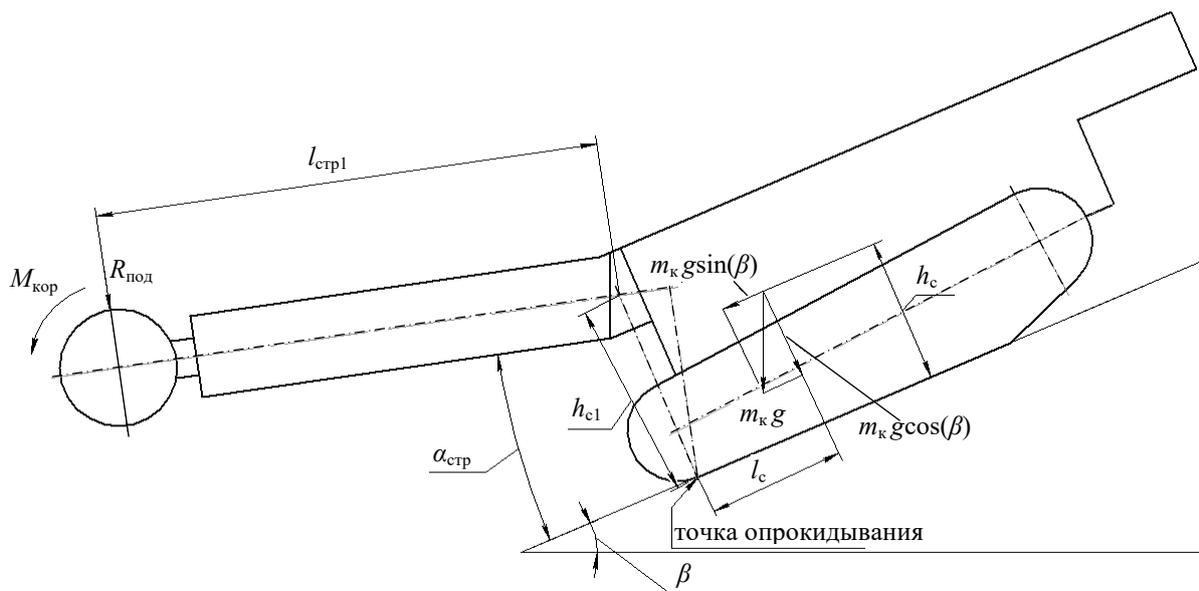


Рисунок 2 – Расчетная схема продольной устойчивости комбайна КПМ-40

Восстанавливающий момент:

$$M_{\text{восст}} = m_k \cdot g \cdot \cos(\beta) \cdot l_c, \quad (2)$$

где m_k – масса комбайна, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

β – угол наклона выработки, град;

l_c – расстояние от центра тяжести комбайна до точки опрокидывания, м.

В данном расчетном случае в качестве точки опрокидывания принимается передняя точка траковой цепи.

Опрокидывающий момент, создаваемый составляющей силы тяжести комбайна:

$$M_{\text{опр комб}} = m_k \cdot g \cdot \sin(\beta) \cdot h_c, \quad (3)$$

где h_c – высота центра тяжести комбайна, м.

Момент на стреле, создаваемый окружной силой на коронке для комбайна КИД-220М:

$$M_{\text{кор}} = F_t \cdot (l_{\text{стр1}} + h_{c1} \cdot \sin(\alpha_{\text{стр}})), \quad (4)$$

где F_t – окружная сила на коронке, Н;

$l_{\text{стр1}}$ – расстояние от центра приложения окружной силы до точки качания стрелы, м;

h_{c1} – высота от точки опрокидывания до оси качания стрелы, м.

Окружная сила определяется из выражения:

$$F_t = \frac{N \cdot \eta}{\omega \cdot R_{\text{кор}}}, \quad (5)$$

где N – мощность двигателя резания, Вт;

η – КПД привода резания;

ω – угловая скорость вращения коронки, рад/с;

$R_{\text{кор}}$ – радиус коронки по резцам, м.

Для комбайна КПИМ-40 опрокидывающий момент будет реализовываться крутящим моментом коронки как:

$$M_{\text{кор}} = N \cdot \eta / \omega. \quad (6)$$

Суммарную реакцию забоя на усилие, создаваемое гидроцилиндрами подъема стрелы можно определить по схеме (рисунок 3).

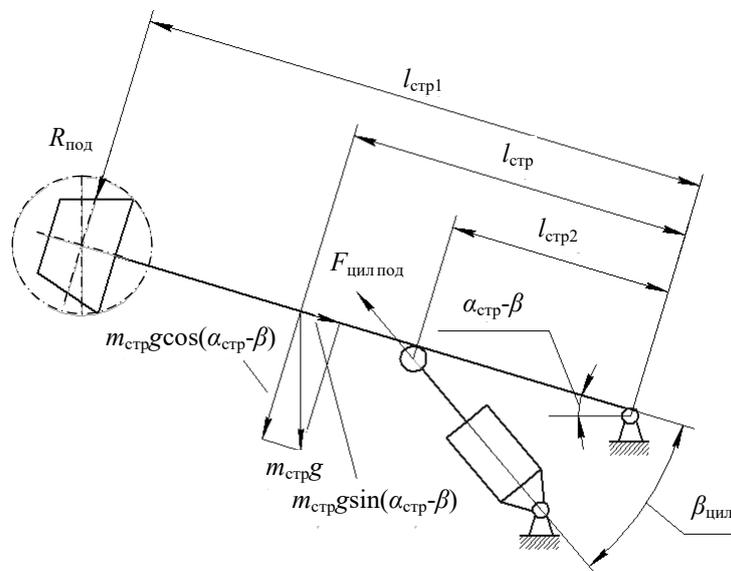


Рисунок 3 – Расчетная схема для определения реакции забоя

Реакция забоя:

$$R_{\text{под}} = \frac{2 \cdot F_{\text{цил под}} \cdot \sin(\beta_{\text{цил}}) \cdot l_{\text{стр2}} - m_{\text{стр}} \cdot g \cdot \cos(\alpha_{\text{стр}} - \beta) \cdot l_{\text{стр}}}{l_{\text{стр1}}}, \quad (7)$$

где $F_{\text{цил под}}$ (опуск) – усилие гидроцилиндра при подъеме (опускании) исполнительного органа, Н;

$\beta_{\text{цил}}$ – угол наклона гидроцилиндра к оси стрелы, град;

$l_{\text{стр2}}$ – расстояние от места установки гидроцилиндра до точки опрокидывания, м.

$m_{\text{стр}}$ – масса стрелы, кг;

$\alpha_{\text{стр}}$ – угол наклона стрелы относительно поверхности уклона выработки, град;

$l_{\text{стр}}$ – расстояние от центра тяжести стрелы до точки опрокидывания, м;

Момент опрокидывания от сил, приведенных к реакции забоя:

$$M_{\text{цил}} = R_{\text{под}} \cdot (l_{\text{стр1}} + h_{\text{cl}} \cdot \sin(\alpha_{\text{стр}})). \quad (8)$$

Таким образом, опрокидывающий момент определяется по формуле:

$$M_{\text{опр}} = M_{\text{опркомб}} + M_{\text{кор}} + M_{\text{цил}}. \quad (9)$$

Зависимость угла наклона гидроцилиндра от угла наклона стрелы, полученная геометрическими построениями изображена на рисунке 4.

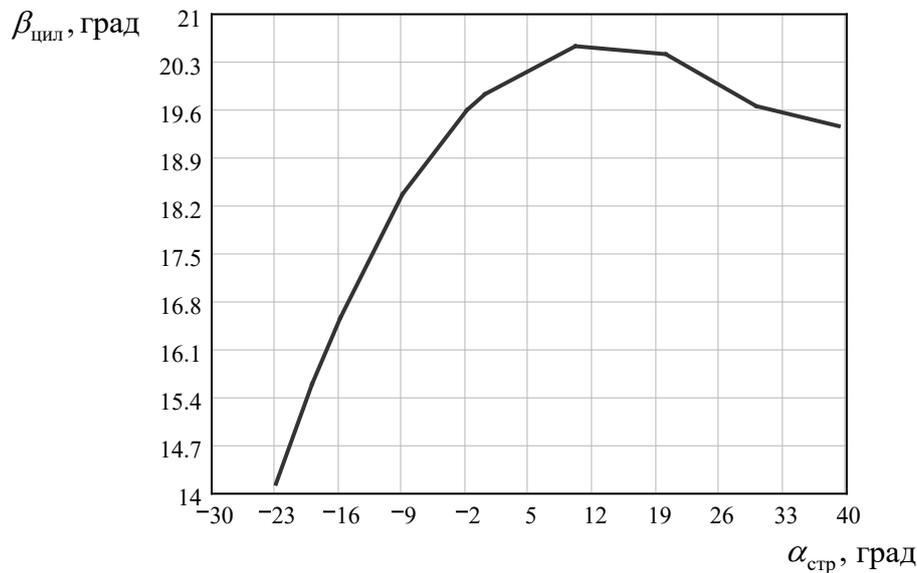


Рисунок 4 – График зависимости угла наклона гидроцилиндра от угла наклона стрелы

Данный график носит нелинейный характер, следовательно, зависимость коэффициентов устойчивости в зависимости от угла наклона стрелы будет также иметь нелинейный характер (рисунок 5).

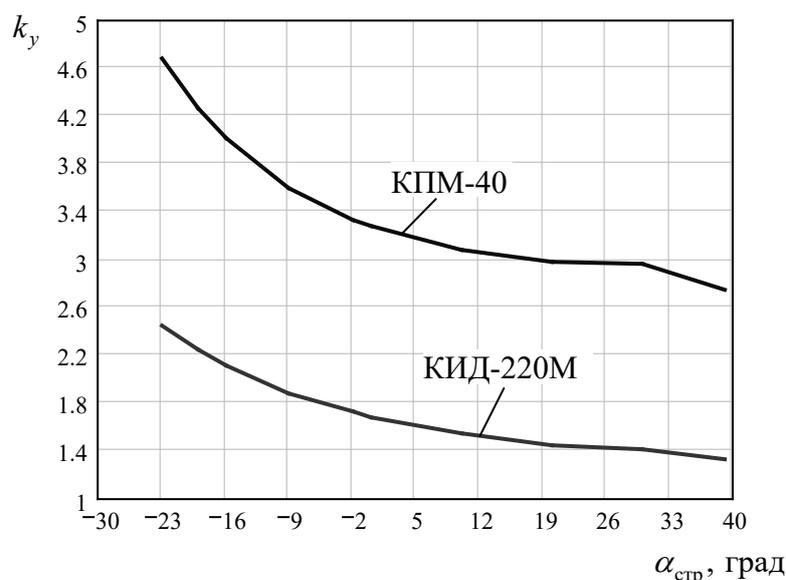


Рисунок 5 – График зависимости коэффициента устойчивости от угла наклона стрелы

Анализ данного графика позволяет сделать следующие выводы:

- оба комбайна обладают достаточной устойчивостью в данном расчетном случае;
- наименьшей устойчивостью комбайны обладают при верхнем положении стрелы;
- комбайн КПМ-40 с двойной аксиальной коронкой имеет запас устойчивости на 60 % выше комбайна КИД-220М во всем диапазоне подъема стрелы.

Рассмотрим второй расчетный случай при проверке комбайна на продольную устойчивость.

Расчетная схема комбайна КИД-220М представлена на рисунке 6, расчетная схема комбайна КПМ-40 – на рисунке 7.

В данных расчетных случаях момент, восстанавливающий устойчивость комбайна образуется составляющей силы тяжести комбайна и стрелы исполнительного органа, а для комбайна КПМ-40 дополнительно крутящим моментом на коронке, помимо этого восстанавливающий момент образуется задними гидроцилиндрами распора.

Опрокидывающий момент создается составляющей силы тяжести самого комбайна, усилиями гидроцилиндров опускания стрелы, приведенными к общей реакции забоя, усилиями воздействия коронки на забой для комбайна КИД-220М.

Восстанавливающий момент для комбайна КИД-220М:

$$M_{\text{восст}} = m_k \cdot g \cdot \cos(\beta) \cdot l_{c1} + 2 \cdot F_{\text{цил расп}} \cdot L_{\text{расп}}, \quad (10)$$

где L – длина опорных гусениц, м;

$F_{\text{цил расп}}$ – усилие гидроцилиндров распора, Н;

$L_{\text{расп}}$ – расстояние от оси распора до точки опрокидывания, м.

Восстанавливающий момент для комбайна КПМ-40:

$$M_{\text{восст}} = m_k \cdot g \cdot \cos(\beta) \cdot l_{c1} + M_{\text{кор}} + 2 \cdot F_{\text{цил расп}} \cdot L_{\text{расп}}, \quad (11)$$

где l_{c1} – расстояние от центра тяжести комбайна до точки опрокидывания.

Рассмотрим два случая устойчивости: первый – без использования гидроцилиндров распора, второй – с использованием гидроцилиндров распора.

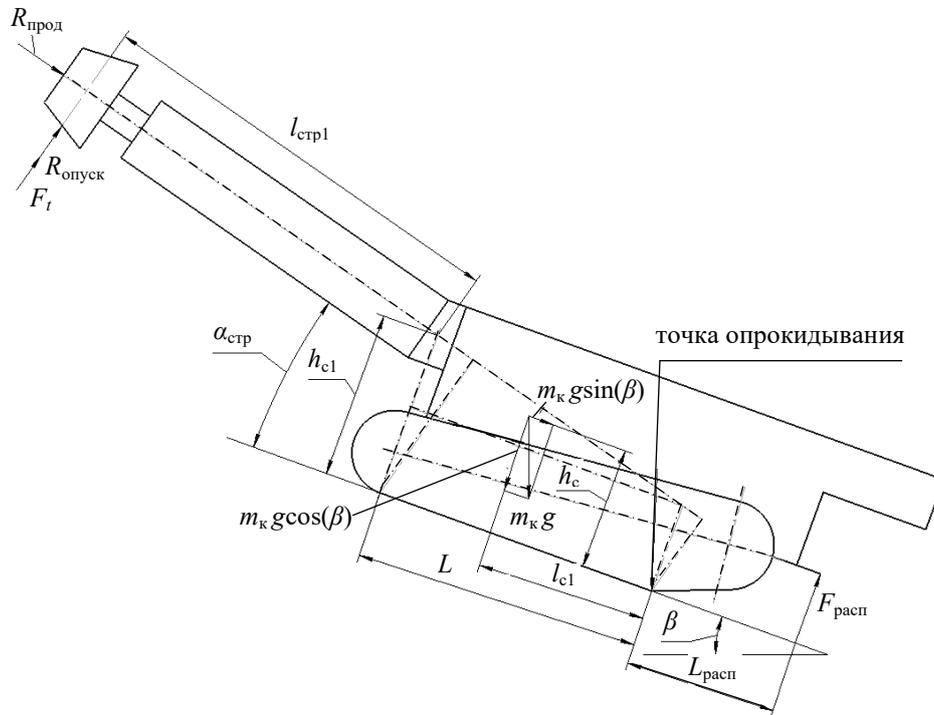


Рисунок 6 – Расчетная схема продольной устойчивости комбайна КИД-220М

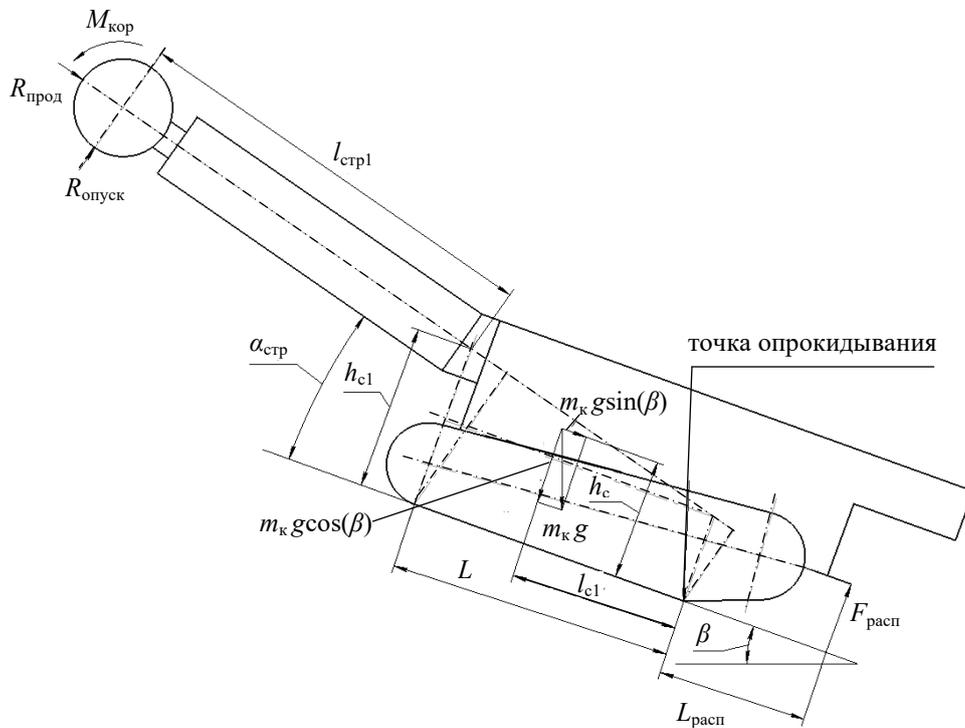


Рисунок 7 – Расчетная схема продольной устойчивости комбайна КИМ-40

Опрокидывающий момент, создаваемый составляющей силы тяжести комбайна определяется по формуле 2.

Момент на стреле, создаваемый окружной силой на коронке для комбайна КИД-220М:

$$M_{\text{кор}} = F_t \cdot (l_{\text{стр1}} + L / \cos(\alpha_{\text{стр}}) + (h_{c1} - L \cdot \text{tg}(\alpha_{\text{стр}})) \cdot \sin(\alpha_{\text{стр}})). \quad (12)$$

Суммарную реакцию забоя на усилие, создаваемое гидроцилиндрами опускания стрелы, можно определить по схеме (рисунок 8). Продольная реакция будет равна усилию гидроцилиндров телескопа.

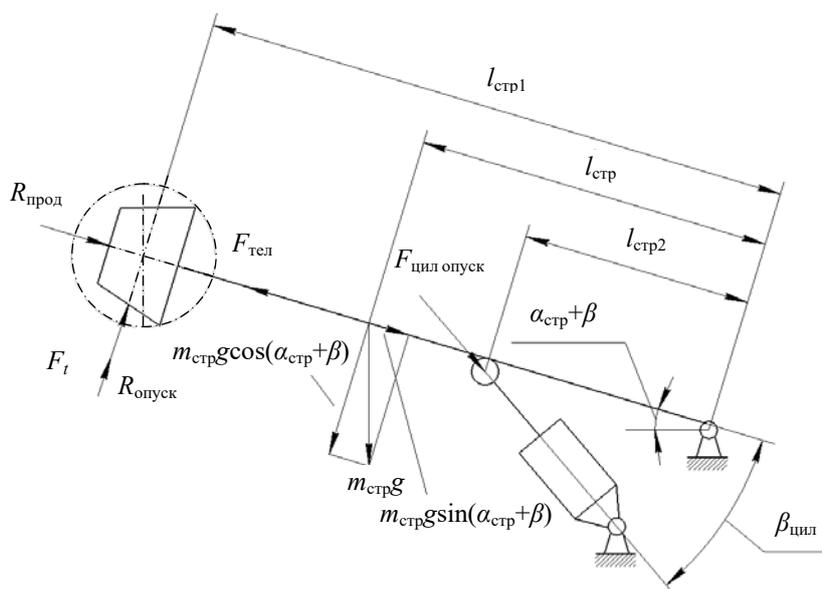


Рисунок 8 – Расчетная схема для определения реакции забоя

Реакция забоя:

$$R_{\text{опуск}} = \frac{2 \cdot F_{\text{цил опуск}} \cdot \sin(\beta_{\text{цил}}) \cdot l_{\text{стр2}} + m_{\text{стр}} \cdot g \cdot \cos(\alpha_{\text{стр}} + \beta) \cdot l_{\text{стр}}}{l_{\text{стр1}}}. \quad (13)$$

Момент опрокидывания от сил, приведенных к реакции забоя:

$$M_{\text{цил}} = R_{\text{опуск}} \cdot (l_{\text{стр1}} + L / \cos(\alpha_{\text{стр}}) + (h_{c1} - L \cdot \text{tg}(\alpha_{\text{стр}})) \cdot \sin(\alpha_{\text{стр}})). \quad (14)$$

Момент опрокидывания от силы гидроцилиндров телескопа, приведенных к реакции забоя:

$$M_{\text{тел}} = 2 \cdot F_{\text{тел}} \cdot (h_{c1} - L \cdot \text{tg}(\alpha_{\text{стр}})) \cdot \cos(\alpha_{\text{стр}}), \quad (15)$$

где $F_{\text{тел}}$ – усилие гидроцилиндра телескопа, Н.

Опрокидывающий момент для комбайна КИД-220М определяется по формуле 16, для комбайна КПМ-40 – по формуле 17.

$$M_{\text{опр}} = M_{\text{опркомб}} + M_{\text{кор}} + M_{\text{цил}} + M_{\text{тел}} \cdot \quad (16)$$

$$M_{\text{опр}} = M_{\text{опркомб}} + M_{\text{цил}} + M_{\text{тел}} \cdot \quad (17)$$

График зависимости коэффициента устойчивости от угла наклона стрелы без применения гидроцилиндров распора представлен на рисунке 9.

График зависимости коэффициента устойчивости от угла наклона стрелы с применением гидроцилиндров распора представлен на рисунке 10.

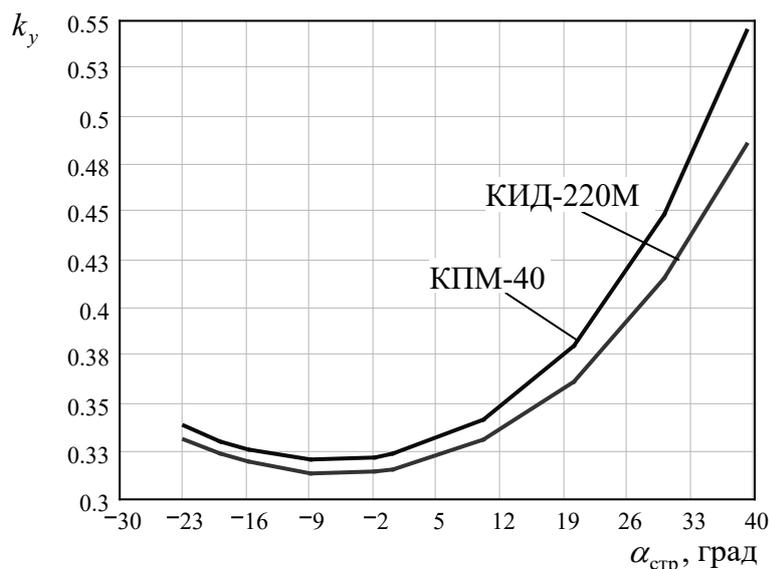


Рисунок 9 – График зависимости коэффициента устойчивости без использования гидроцилиндров распора от угла наклона стрелы

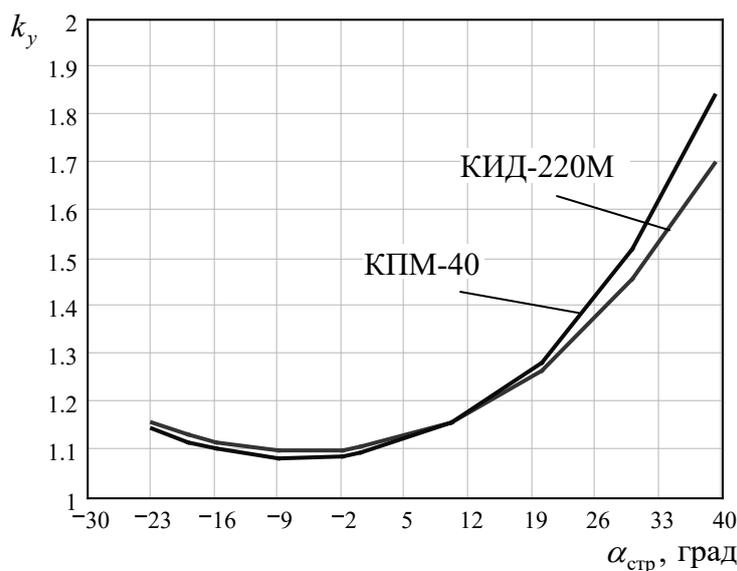


Рисунок 10 – График зависимости коэффициента устойчивости с использованием гидроцилиндров распора от угла наклона стрелы

Анализ графиков на рисунках 9 и 10 позволяет сделать следующие выводы:

1. При данном случае нагружения устойчивость комбайна обеспечивается только при применении задних гидроцилиндров распора.
2. Наименьшей устойчивостью комбайн обладает при положении стрелы вдоль опорных гусениц.
3. Устойчивость комбайнов КИД-220М и КПМ-40 практически одинакова во всем диапазоне опускания стрелы.

Для проверки поперечной устойчивости комбайна по первому и второму расчетному случаю воспользуемся расчетной схемой рисунка 11 для комбайна КИД-220М и расчетной схемой рисунка 12 для КПМ-40. В первом случае опрокидывание будет производиться относительно точки А, во втором – относительно точки С.

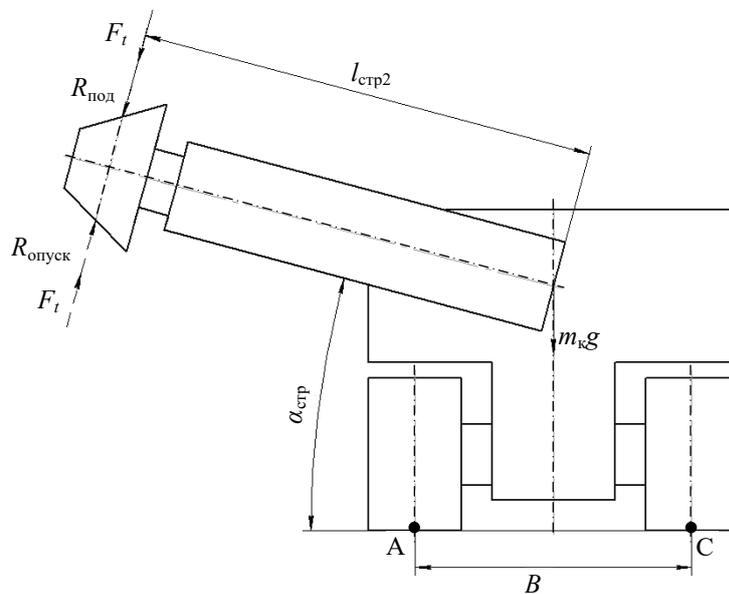


Рисунок 11 – Расчетная схема продольной устойчивости комбайна КИД-220М

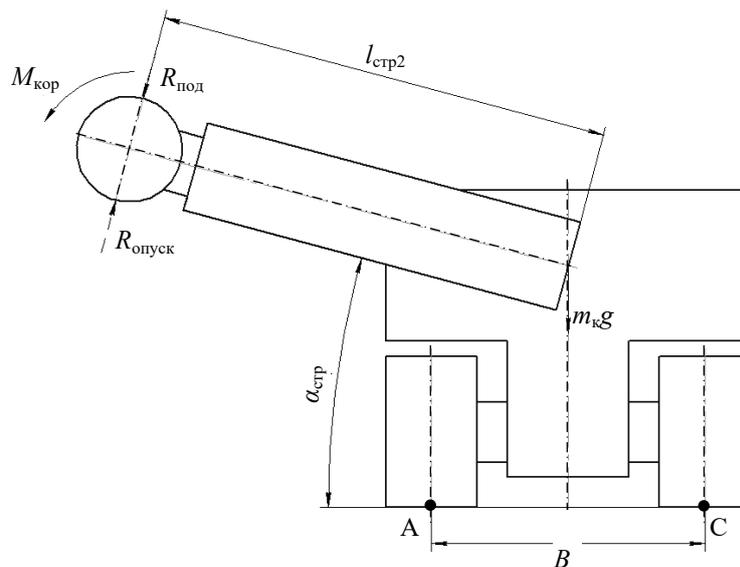


Рисунок 12 – Расчетная схема продольной устойчивости комбайна КПМ-40

Реакции забоя по первому и второму расчетному случаю принимаем по формулам 7 и 13 соответственно.

Момент опрокидывания от внешних сил для комбайна КИД-220М:

$$M_{\text{опр1}} = (R_{\text{под}} + F_t) \cdot (l_{\text{стр2}} - B / (2 \cdot \cos(\alpha_{\text{стр}}))) , \quad (18)$$

$$M_{\text{опр2}} = (R_{\text{опуск}} + F_t) \cdot (l_{\text{стр2}} + B / (2 \cdot \cos(\alpha_{\text{стр}}))) , \quad (19)$$

где B – колея комбайна.

Момент опрокидывания от внешних сил для комбайна КПМ-40:

$$M_{\text{опр1}} = R_{\text{под}} \cdot (l_{\text{стр2}} - B / (2 \cdot \cos(\alpha_{\text{стр}}))) + M_{\text{кор}} \cdot \cos(\gamma) , \quad (20)$$

$$M_{\text{опр2}} = R_{\text{опуск}} \cdot (l_{\text{стр2}} + B / (2 \cdot \cos(\alpha_{\text{стр}}))) - M_{\text{кор}} \cdot \cos(\gamma) , \quad (21)$$

где γ – максимальный угол разворота стрелы в горизонтальной плоскости, град.

Восстанавливающий момент для обоих расчетных случаев:

$$M_{\text{восст}} = m_k \cdot g \cdot B / 2 . \quad (22)$$

Графики зависимости коэффициента устойчивости от угла наклона стрелы для первого и второго расчетного случая представлены на рисунках 13 и 14 соответственно.

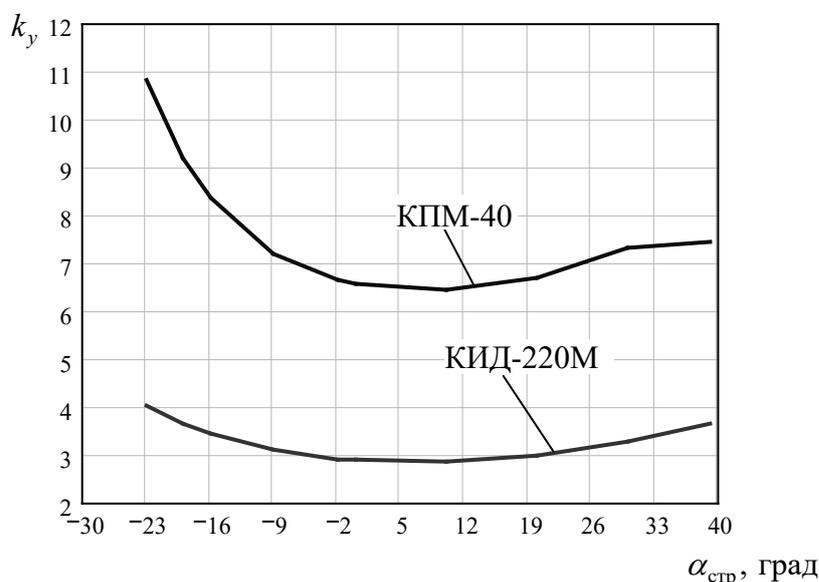


Рисунок 13 – График зависимости коэффициента устойчивости при расчете поперечной устойчивости в первом расчетном случае

Анализ графиков на рисунках 13 и 14 позволяет сделать следующие выводы:

1. В рассматриваемых случаях нагружения устойчивость комбайна обеспечивается во всем диапазоне работы стрелы.
2. Наименьшей устойчивостью комбайн обладает при положении стрелы вдоль опорных гусениц.
3. Устойчивость комбайна КПМ-40 выше устойчивости комбайна КИД-220М.

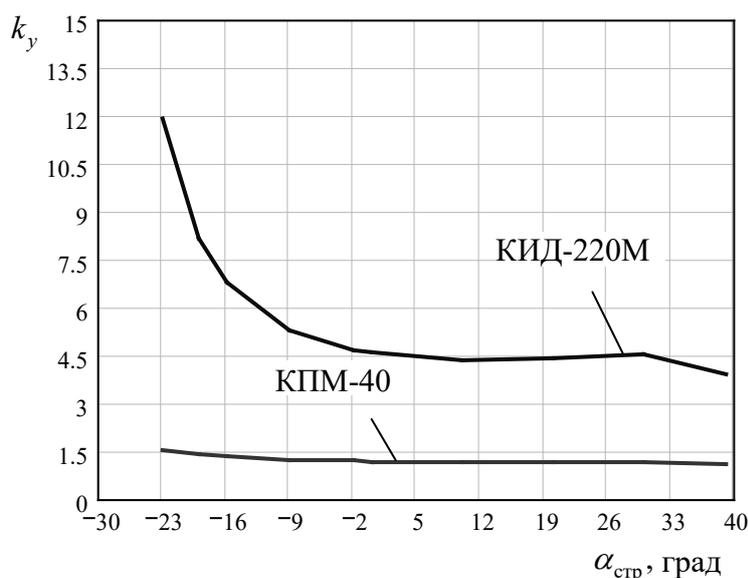


Рисунок 14 – График зависимости коэффициента устойчивости при расчете поперечной устойчивости во втором расчетном случае

Выводы

1. Вышеописанные комбайны обладают достаточной устойчивостью при зарубке вниз и при поперечном расположении стрелы.
2. При работе вверх без использования гидроцилиндров распора устойчивость комбайна не обеспечивается.
3. Наибольшей устойчивостью комбайны обладают при расположении стрелы в нижнем положении.
4. Устойчивость комбайна КПМ-40 с поперечной коронкой выше устойчивости комбайна КИД-220М во всех режимах работы во всех расчетных случаях.

Список использованных источников

1. Малеев, Г.В. Проектирование и конструирование горных машин и комплексов: учебник для вузов / Г.В. Малеев, В.Г. Гуляев, Н.Г. Бойко. – М.: Недра, 1988. – 368 с.
2. Малевич, Н.А. Горнопроходческие машины и комплексы: учебник для вузов / Н.А. Малевич. – 2-е изд. – М.: Недра, 1980. – 384 с.
3. Инструкция по эксплуатации комбайна КИД-220М. – Солигорск, 2000. – 23 с.

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

The comparative analysis of stability of selective action roadheaders

The article is about the study of stability of selective action roadheaders depending on cutting device load. The comparative analysis of the roadheaders with cutting devices equipped with a single axial bit and a double transverse cutting bit was carried out.

Поступила в редакцию 28.01.2014 г.

УДК 622.232.83.054.522

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СПАРЕННОГО ПЛАНЕТАРНО-ДИСКОВОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ПРОХОДЧЕСКО-ОЧИСТНОГО КОМБАЙНА

Басалай Г.А. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь)

Выполнен анализ планетарных исполнительных органов (ИО) проходческих комбайнов. Представлены две принципиально новые схемы спаренного планетарно-дискового исполнительного органа проходческо-очистного комбайна: в первой – исполнительный орган оснащен дополнительными зубками на редукторах режущих дисков; во второй схеме предусмотрен угол поворота осей вращения рукоятей левого и правого ИО в переносном движении относительно продольной оси комбайна. Разработаны расчетные схемы и алгоритмы моделирования траекторий фрезерующих элементов.

Введение

Термин «планетарные исполнительные органы» носит условный характер, однако он хорошо отражает вид движения инструмента исполнительного органа. Это движение является результатом сложения двух вращательных движений подобно движению планет. Рабочий инструмент планетарных органов разрушения имеет сложную траекторию движения, являющуюся результатом сложения переносного движения и относительного движения [1-3]. Планетарные органы разрушения обладают рядом достоинств по сравнению с буровыми механизмами роторного типа, а именно:

- разрушают большие площади забоя относительно небольшим числом одновременно работающего инструмента;
- передают на каждый инструмент значительную мощность, что особенно важно при проведении выработок по породам с коэффициентом крепости $f < 6$;
- имеют относительно невысокую энергоемкость процесса разрушения по сравнению с другими типами исполнительных органов;
- требуют небольших осевых (напорных) усилий;
- имеют незначительный опрокидывающий реактивный момент.

Характерные недостатки планетарных исполнительных органов:

- сложная конструкция редуктора привода, особенно для многорежимных органов разрушения; большой рабочий путь инструмента за один оборот водила в плоских и сферических органах разрушения;
- сложность кинематических расчетов и правильного выбора параметров траекторий движения инструментов.

В зависимости от характера взаимодействия режущего инструмента с забоем планетарные исполнительные органы можно классифицировать по ряду признаков.

Основным признаком такой классификации является расположение осей относительного и переносного движений фрезерующих элементов.

Исполнительные органы с осями рабочих дисков, расположенными под некоторым углом, называются сферическими. Обрабатываемый ими забой имеет сферическую форму, а рабочие инструменты двигаются по циклоидальным кривым, лежащим на сфере.

Исполнительные органы, у которых угол расположения осей относительного и переносного вращения рабочих дисков равен 90° , называются кольцевыми и разделя-

ются на две подгруппы: планетарные исполнительные органы с перпендикулярными и наклонными осями.

Исполнительные органы с осями рабочих дисков, параллельными оси водила, называются плоскими, так как обрабатываемый ими забой имеет плоскую форму. Исполнительные органы комбинированного типа состоят из парных рабочих дисков, расположенных в плоскостях, перпендикулярных к забою, с осями вращения, параллельными забою, и рабочих дисков с осями вращения, перпендикулярными к забою.

Результаты исследований

На рудниках Старобинского месторождения калийных солей в технологическом процессе по добыче руды камерным способом, а также при проведении подготовительных выработок для очистных комплексов широко применяются проходческо-очистные комбайны Урал-10А (Копейский машиностроительный завод, Россия), а также КПО-10,5 (ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», Беларусь). Комбайн состоит из сдвоенного исполнительного органа планетарного типа, разрушающего забой двумя парами режущих дисков, верхнего отбойного устройства, оформляющего кровлю выработки, и бермового органа с боковыми фрезами и шнеками, служащими для выравнивания почвы и подрезки углов выработки, гусеничного хода, осуществляющего перемещение комбайна на рабочих и маневровых режимах. Общий вид сдвоенного планетарного исполнительного органа, а также редукторов относительного и переносного вращения режущих дисков показаны на рисунке 1. Разрушение массива производится режущими дисками при их относительном и переносном движениях.



Рисунок 1 – Вид спереди (со стороны забоя) на спаренный исполнительный орган проходческо-очистного комбайна

Общий вид забоя представлен на рисунке 2.

Для подбора отбитой руды и передачи ее в транспортные средства служат: шнек, боковые фрезы и конвейер, выполненный в виде рамы комбайна, внутри которой размещена скребковая цепь.

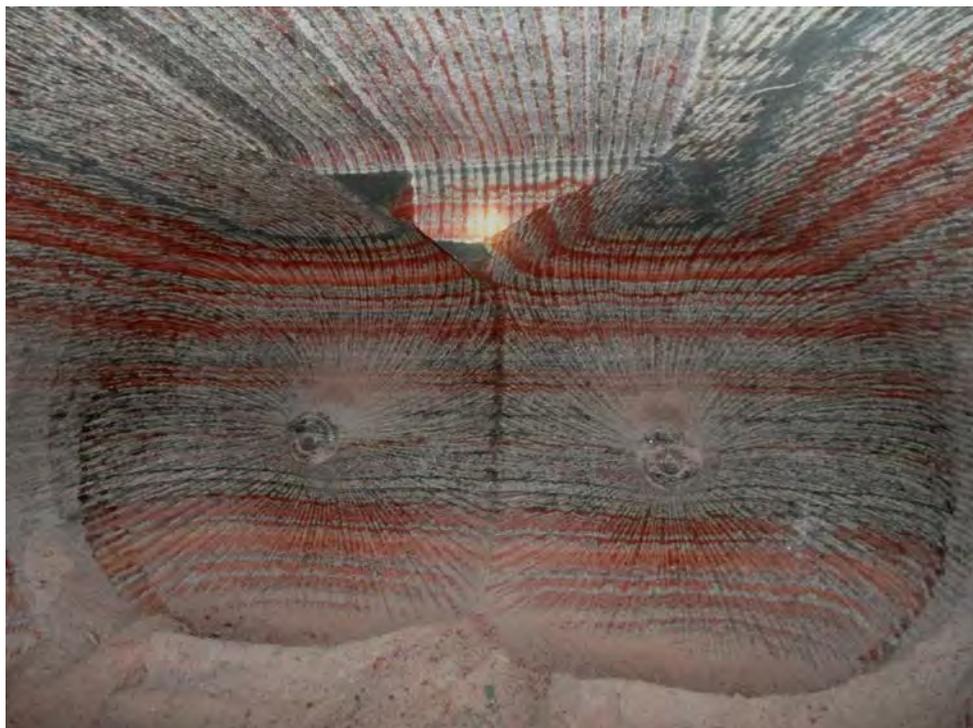


Рисунок 2 – Поперечное сечение выработки, проходимой комбайном со спаренным планетарно-дисковым исполнительным органом

Одним из основных рабочих механизмов комбайна являются две пары резовых дисков на левом и правом исполнительных органах. Резцы дисков совершают сложное движение, складывающееся из относительного (вращение резового диска относительно своей оси) и переносного (вращение дисков относительно оси редуктора исполнительного органа) движений. Раздаточные редукторы в рабочем положении взаимно развернуты на 90° , а их вращение синхронизировано приводом переносного вращения. Синхронизация переносного вращения обеих пар резовых дисков осуществляется за счет жесткой кинематической связи через общий привод переносного вращения. Эффективность их работы в значительной степени зависит от оптимальных режимов их эксплуатации.

Оптимизация режимов работы резов в зависимости от конкретных горно-геологических и горно-технических условий сопряжена со сложностью кинематических расчетов и правильностью выбора параметров траекторий движения инструмента. На основании ранее разработанных автором расчетных схем для анализа планетарно-дискового механизма с перпендикулярными осями проекции траекторий резов данного исполнительного органа на фронтальную и продольную плоскости можно представить системой параметрических уравнений:

$$x_M = a \cdot \sin(\omega_p \cdot t) + D/2 \cdot \cos(\omega_\phi \cdot t) \cdot \sin(\omega_p \cdot t);$$

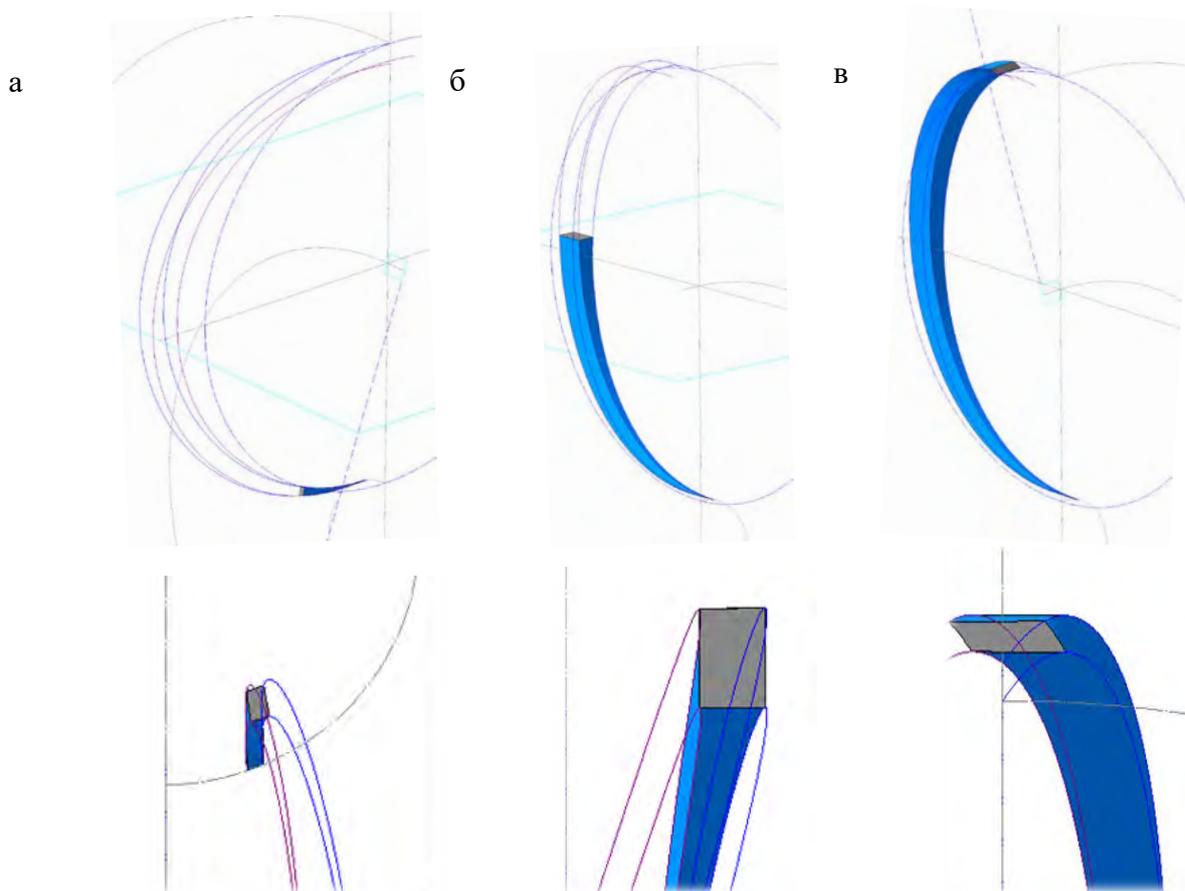
$$y_M = D/2 \cdot \sin(\omega_\phi \cdot t) + w_k \cdot t;$$

$$z_M = a \cdot \cos(\omega_p \cdot t) + D/2 \cdot \cos(\omega_\phi \cdot t) \cdot \cos(\omega_p \cdot t),$$

где a – расстояние между осью вращения рукояти и осью вращения каждой из фрез, м;
 ω_p – угловая скорость переносного вращения рукояти, c^{-1} ;
 t – текущее значение времени, с;
 D – диаметр фрезы по концам режущих кромок зубков, м;
 ω_ϕ – угловые скорости относительного вращения фрез, c^{-1} ;
 w_k – скорость подачи комбайна на забой, м/с.

Одной из важных особенностей планетарно-дисковых исполнительных органов с перпендикулярными осями является непостоянство толщины стружки срезаемой одним резцом. При различных значениях угловых скоростей фрез и ротора, шага расстановки резцов, скорости подачи комбайна толщина стружки, срезаемой одним резцом, может существенно изменяться за один оборот фрезы (диска).

Независимо от соотношения угловых скоростей, у планетарных ИО, как и у цилиндрических в начале и в конце рабочего хода резцов срезается тонкий слой стружки, толщина которого нарастает до половины рабочего хода, а затем снова снижается до нулевого значения (рисунок 3). Это является причиной повышенного пылеобразования при фрезеровании горной породы. Данная проблема актуальна для проходческо-очистных комбайнов, используемых на рудниках ОАО «Беларуськалий», но особенно сильно планетарных ИО является так же то, что с началом рабочего хода резца увеличивается не только его заглубление (т.е. толщина срезаемого слоя), но и скорость резания, ширина обрабатываемой полосы, которые нарастают до конца рабочего хода. Это вызывает увеличение нагрузки на резцы и приводит к неэффективному расходу энергии на срезание породы в конце рабочего хода резцов.



а – в начале рабочего хода; б – в середине рабочего хода; в – в конце рабочего хода

Рисунок 3 – Сечение срезаемой стружки

С целью повышения эффективности фрезерования горной породы спаренным планетарно-дисковым исполнительным органом проходческо-очистного комбайна с участием автора разработаны две принципиально новые схемы.

Первая разработка [4], принципиальная схема которой представлена на рисунках 4 и 5, характеризуется дополнительными резами, установленными в резцодержателях на кронштейнах рукоятей. Привод планетарного ИО обеспечивает относительное и переносное вращения четырех режущим дискам 1. Он включает в себя три кинематические цепи. Первая и вторая цепи состоят из одинаковых элементов привода левого и правого ИО, последовательно соединенных между собой: электродвигатель 2, муфта 3, основной редуктор 4, промежуточный вал 5, раздаточный редуктор 6 с двумя рукоятями 7, каждая из которых снабжена режущим диском 1 с выходным валом, подвижно закрепленным посредством роликоподшипников на рукояти.

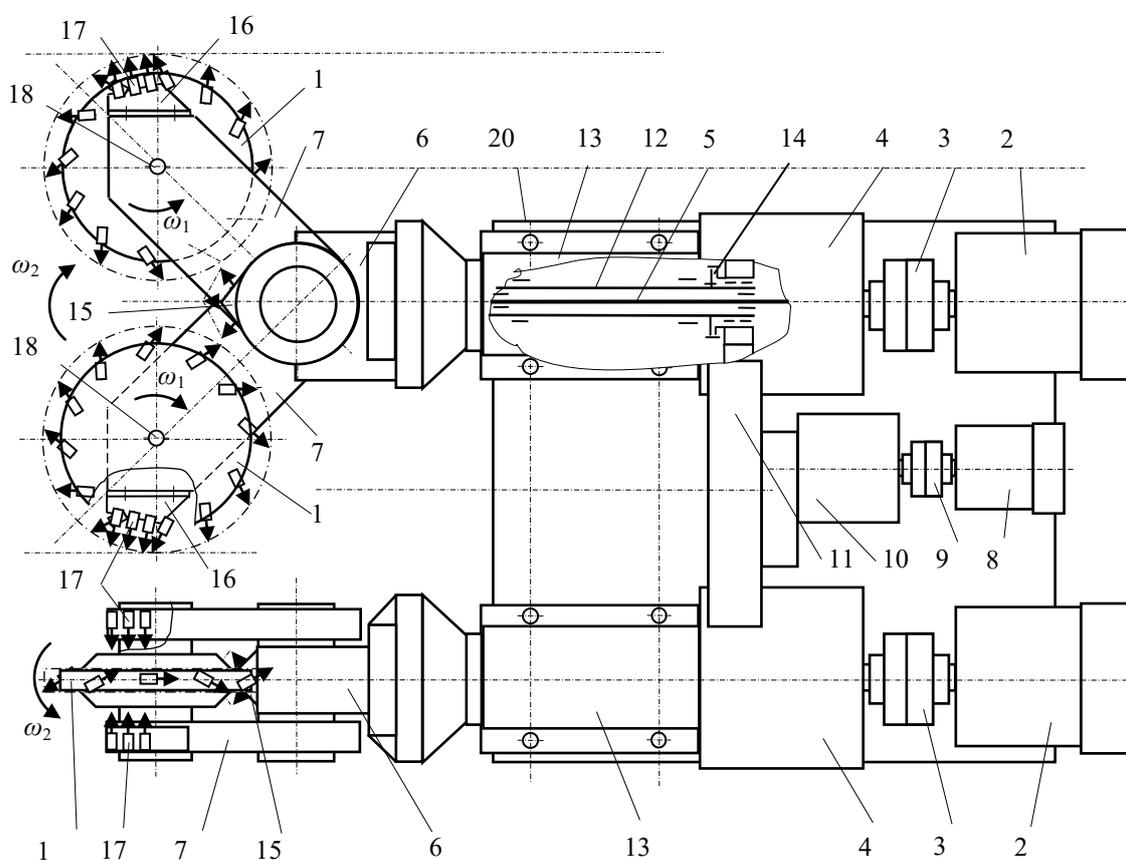


Рисунок 4 – Планетарный сдвоенный исполнительный орган проходческо-очистного комбайна (вид сверху)

Третья кинематическая цепь включает электродвигатель 8, муфту 9, редуктор 10 переносного вращения режущих дисков 1, распределительный редуктор 11 переносного вращения и полый вал 12. Промежуточные валы 5 и полые валы 12 установлены между собой соосно в опоре 13. На передних торцах полых валов 12 закреплены корпуса раздаточных редукторов 6. С другой стороны на полых валах 12 установлены свободно зубчатые колеса 14 с муфтами управления. На корпусах раздаточных редукторов 6 установлены забурники 15 с резами. На рукоятях 7 режущих дисков 1 закреплены

кронштейны 16, на свободных концах которых закреплены резцодержатели с дополнительными резами 17, с возможностью осуществления опережающего снятия слоя породы по контуру внешних траекторий резов режущих дисков. При этом режущие кромки дополнительных резов 17 расположены в плоскости, перпендикулярной осям 18 переносного вращения рукоятей с режущими дисками.

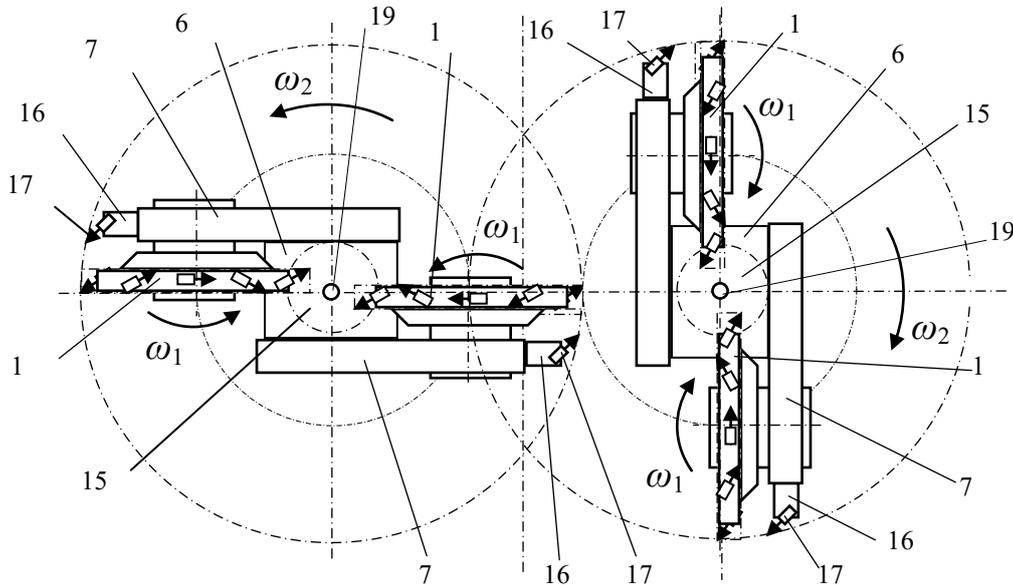


Рисунок 5 – Положение режущих дисков в рабочем режиме (вид спереди)

Раздаточный редуктор 6 состоит из конической передачи, вмонтированной в корпус, к которому с двух сторон соосно ведомым валам крепятся рукояти 7 с рядом цилиндрических шестерен и двумя режущими дисками 1. При перенастройке комбайна угловая фиксация с рукоятей 7 относительно корпуса редуктора 6 снимается, и они раздвигаются до нужного размера.

Привод переносного вращения включает в себя редуктор 10 переносного вращения, соединенный с распределительным редуктором 11 переносного вращения, который посредством зубчатых колес 14 с муфтами управления соединен кинематически с полыми валами 12 левого и правого ИО.

Раздаточные редукторы 6 относительного вращения дисков 1 левого и правого ИО в рабочем положении взаимно развернуты на 90° , а их вращение синхронизировано распределительным редуктором 11 переносного вращения. Снятие синхронизации переносного вращения, что необходимо при холостом перегоне комбайна по горной выработке, обеспечивается муфтами управления зубчатых колес 14.

Основные редукторы 4 с двигателями 2, а также редуктор 10 переносного вращения с двигателем 8 и распределительный редуктор 11 левого и правого ИО крепятся к платформе 20. Она представляет собой металлоконструкцию, на которой крепятся исполнительный орган, отбойное устройство и часть сборочных единиц щита ограждения. Платформа имеет две пары проушин, одной из которых она крепится к раме грузчика, а второй – устанавливается на гидроцилиндры для подъема-опускания планетарного исполнительного органа.

Резцы каждого из четырех режущих дисков 1 совершают сложное движение, складывающееся из относительного ω_1 (вращение резовых дисков 1 относительно своих осей 18) и переносного ω_2 (парное вращение дисков 1 вместе с раздаточными редукторами 6 относительно осей 19 основных редукторов 4 левого и правого ИО) движений. Дополнительные резцы 17, установленные в резцодержателях на кронштейнах 16 рукоятей 7, совершают круговое движение с угловыми скоростями ω_2 , равными угловым скоростям ω_2 переносного вращения режущих дисков 1. Направления угловых скоростей ω_1 относительного вращения дисков 1, на рукоятях 7, закрепленных парами на одном распределительном редукторе 6, а также направления угловых скоростей ω_2 осей 19 переносного вращения левого и правого ИО – встречные.

Применение дополнительных резцов, закрепленных на кронштейнах, которые установлены на рукоятях, с возможностью осуществления опережающего снятия слоя породы по контуру внешних траекторий резцов режущих дисков таким образом, что режущие кромки резцов на резцодержателях располагаются в плоскости, перпендикулярной осям переносного вращения рукоятей с режущими дисками, по контуру внешних траекторий резцов, закрепленных на режущих дисках, обеспечивает более эффективное фрезерование забоя по внешнему контуру выработки.

Во второй схеме [5], в отличие от схем с параллельным расположением осей вращения рукоятей левого и правого исполнительных органов, имеющих место в комбайнах Урал-10 и КПО-10,5, предусмотрен угол β «развала» осей вращения левого и правого ИО в переносном движении относительно продольной оси комбайна (относительно вектора скорости подачи w_k комбайна на забой) в горизонтальной плоскости (рисунок 6). Это позволяет значительно уменьшить площадь перекрытия зон фрезерования в центральной части забоя и одновременно увеличить интенсивность обработки краевых зон.

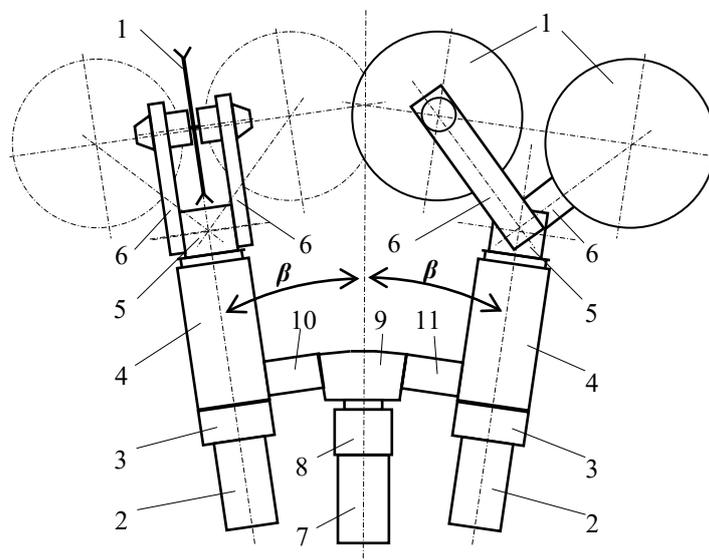


Рисунок 6 – Принципиальная схема спаренного планетарно-дискового исполнительного органа проходческо-очистного комбайна с непараллельными осями вращения рукоятей

Относительное вращение четырех режущих дисков 1 (рисунок 6) обеспечивается от двух электродвигателей 2 через планетарные передачи 3, внутренние валы в ре-

дукторах 4 переносного движения, конические распределительные редукторы 5 и редукторы, расположенные в корпусах рукоятей 6. Переносное вращение рукоятей 6 с режущими дисками 1 левого и правого исполнительных органов происходит от электродвигателя 7 через двухступенчатую планетарную передачу 8, распределительную коническую передачу 9, левую и правую промежуточные цилиндрические передачи 10 и 11 на зубчатые венцы, установленные с помощью кулачковых управляемых муфт на полых валах, соединенных фланцами с корпусами распределительных редукторов 5.

В ходе анализа конструктивных параметров спаренного ИО проходческо-очистного комбайна КПО-10,5 разработан алгоритм расчета траектории резцов планетарно-дискового исполнительного органа с перпендикулярно расположенными осями вращения режущих дисков по отношению к переносным вращениям рукоятей и с учетом угла «развала» левого и правого исполнительных органов, по которому была составлена программа, позволяющая изображать в динамике данные траектории. В качестве исходных параметров выбраны радиусы по линиям реза инструмента и водила, а также отношение угловых скоростей рукояти и режущих дисков.

На рисунке 7 изображены расчетные траектории четырех зубков, закрепленных на четырех режущих дисках за время поворота рукоятей левого и правого ИО на 170° : а – при параллельном положении осей вращения рукоятей; б – при $\beta = 20^\circ$; в – при $\beta = 30^\circ$.

В частности, при $\beta \leq 10^\circ$ обеспечивается фрезерование забоя по всей его площади зубками основного ИО, а также фронтальными фрезами, оформляющими кровлю и формирующими почву выработки. При больших углах ($10^\circ < \beta \leq 30^\circ$) происходит отделение породы в криволинейных секторах, расположенных по вертикальной оси симметрии машины, методом «подрубки», то есть отделение части породы от массива без сплошного ее фрезерования.

Заключение

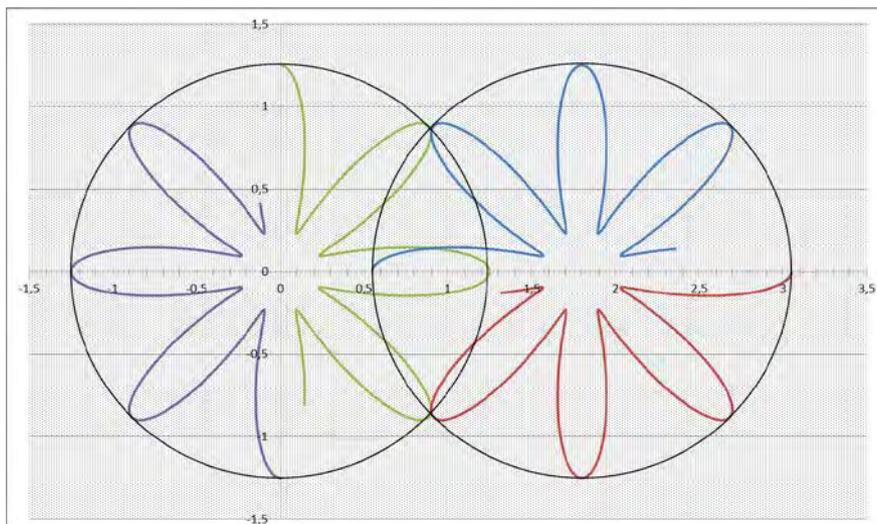
В работе проведен анализ применяемых проходческих комбайнов с планетарными исполнительными органами для подземной разработки угольных и калийных месторождений.

Рассмотрены принципиальные особенности конструкций планетарных исполнительных органов проходческих комбайнов. Разработаны две принципиально новые схемы: первая – исполнительный орган с дополнительными зубками на водилах режущих дисков; во второй схеме предусмотрен угол β «развала» осей вращения левого и правого ИО в переносном движении относительно продольной оси комбайна.

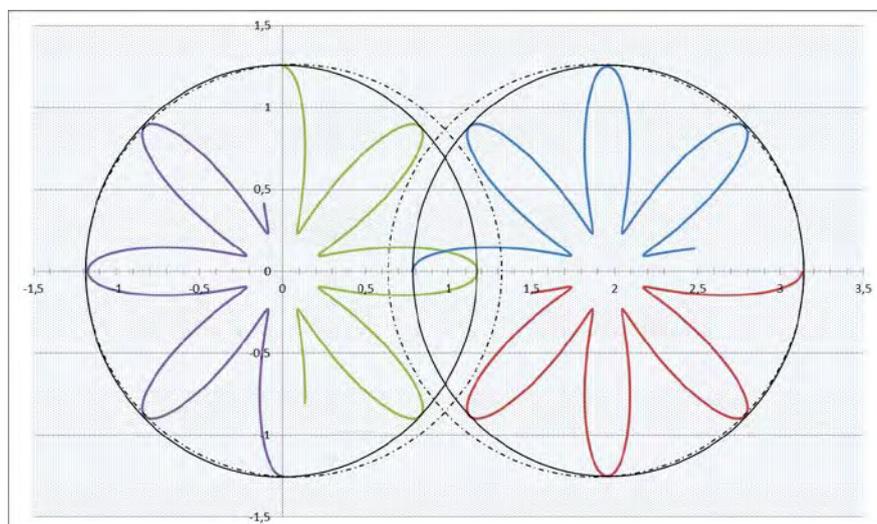
Разработаны алгоритмы расчетов и построены траектории резцов планетарных исполнительных органов с перпендикулярными осями при фрезеровании горной породы. Моделирование траектории движения резцов позволяет рассчитать толщину среза горной породы одним резцом во время его движения и определить наиболее неэффективные зоны фрезерования, т.е. с наименьшей толщиной стружки.

Применение дополнительных резцов, закрепленных на кронштейнах, которые установлены на рукоятях, с возможностью осуществления опережающего снятия слоя породы по контуру внешних траекторий резцов режущих дисков таким образом, что режущие кромки резцов на резцодержателях располагаются в плоскости, перпендикулярной осям переносного вращения рукоятей с режущими дисками, по контуру внешних траекторий резцов, закрепленных на режущих дисках, обеспечивает более эффективное фрезерование забоя по внешнему контуру выработки.

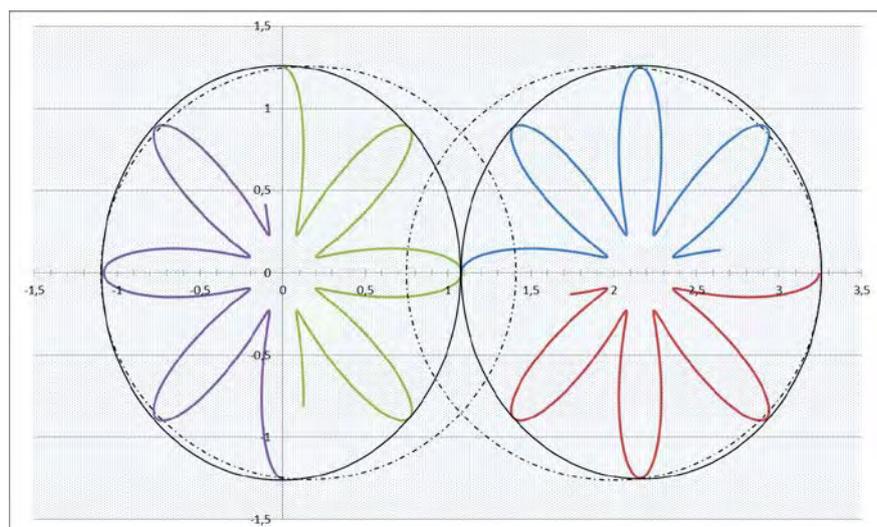
а



б



в



а – при параллельном положении осей вращения рукоятей левого и правого планетарных исполнительных органов; б – при $\beta = 20^\circ$; в – $\beta = 30^\circ$
Рисунок 7 – Траектории зубков четырех режущих дисков спаренного ИО

Установка осей вращения рукоятей левого и правого ИО в переносном движении относительно продольной оси комбайна под острым углом β относительно вектора скорости подачи w_k комбайна на забой в горизонтальной плоскости позволяет значительно уменьшить площадь перекрытия зон фрезерования в центральной части забоя и одновременно увеличить интенсивность обработки краевых зон.

Для проверки работоспособности и эффективности предложенных решений целесообразно изготовить экспериментальный образец изделия и провести комплексные испытания.

Список использованных источников

1. **Солод, В.И.** Проектирование и конструирование горных машин и комплексов / В.И. Солод, В.Н. Гетопанов, В.М. Рачек. – М.: Недра, 1982. – 350 с.
2. Проектирование и конструирование горных машин и комплексов: учебник для ВУЗов / Г.В. Малеев [и др.]. – М.: Недра, 1988. – 368 с.
3. Расчет и конструирование горных машин и комплексов / А.В. Топчиев [и др.]; под ред. А.В. Топчиева. – М.: Недра, 1971. – 278 с.
4. Планетарный исполнительный орган проходческо-очистного комбайна: пат. 9284 Респ. Беларусь, МКИ E21C31/04 / Г.А. Басалай, В.Я. Прушак, И.А. Конопляник, Г.В. Казаченко, М.С. Горностай, В.А. Степанович; заявитель ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством». – № u 20121148; заявл. 21.12.12; опубл. 30.06.13 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 3. – С. 205-206.
5. Привод планетарного исполнительного органа проходческо-очистного комбайна: заявка на изобретение № а 20131328 Респ. Беларусь, МПК E21C31/04 / Г.А. Басалай, М.С. Горностай, В.Я. Прушак; заявитель ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством»; заявл. 14.11.13.

Basalay G.A.

Effectiveness increase of operation of the pared planetary-disk cutting device of the mining-and-roadheading machine

The analysis of planetary cutting devices of heading machines is given. Two absolutely new circuits of the pared planetary-disk cutting device of the mining-and-roadheading machine are developed. The first circuit describes the cutting device with additional cutters on the carrier of the cutting discs. The second circuit provides the angle of rotation axes of the handles of the left and right cutting devices in transportation motion relative to the direct axis of the machine. Principle circuits and simulation algorithms of the milling elements' paths are stated.

Поступила в редакцию 03.03.2014 г.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 674.817, 547.992.3

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОДИФИКАЦИИ
ФЕНОЛФОРМАЛЬДЕГИДНЫХ СМОЛ ЭПОКСИДАМИ И
ПОЛИОРГАНОСИЛОКСАНАМИ В МАТРИЦАХ ДРЕВЕСНЫХ ПЛАСТИКОВ**

Екименко А.Н. (ЧНПУП «Институт инновационных исследований», г. Гомель, Беларусь)

В статье рассмотрена эффективность использования полиорганосилоксанового и эпоксидного модификаторов фенолформальдегидной смолы (ФФС) в части повышения ее ударной вязкости, смачивающей способности к армирующим волокнам, устойчивости к поверхностной усталости при циклических нагрузках и абразивному износу. Описаны особенности взаимодействия ФФС с кремнийорганической смолой, определяющие повышенную термо- и водостойкость составного связующего, а также снижение содержания свободного фенола и формальдегида в отвержденном материале.

Введение

С самого начала своего появления на рынке фенолформальдегидные смолы (ФФС) зарекомендовали себя в роли исключительно эффективного материала, как в качестве связующего композиционных пластиков, так и в качестве защитных покрытий. Их отличительной чертой является сочетание низкой стоимости с высокой длительной прочностью, водостойкостью, а в композиции со стеклянными, базальтовыми, арселоновыми волокнами – еще и достаточно высокой термостойкостью (до 180-250 °С). Однако, как и любой материал, ФФС имеет недостатки, прежде всего – повышенную хрупкость в отвержденном состоянии, а также высокую токсичность из-за присутствия в отвержденной смоле не прореагировавших мономеров фенола и формальдегида, которые впоследствии постепенно выделяются в окружающую среду. Последнее обстоятельство было достаточно критичным, и к концу 80-х годов 20 века казалось, что время ФФС ушло безвозвратно – начался бум термопластов, а нишу ФФС начали занимать другие полимеры. Так, например, в США – стране, по-прежнему формирующей тенденции развития в материаловедении композитов – к этому времени сложилась следующая расстановка востребованности терморезактивных смол: ФФС – 32 %, аминокальдегидные (главным образом, меламино- и мочевиноформальдегидные) – 59 %, изоциановые – 9 %. Однако практика показала, что потенциал ФФС не исчерпан, и в течение последних двадцати лет активизировались исследования по модификации этих смол с тем, чтобы, сохранив их полезные свойства, устранить или, по крайней мере, существенно снизить отрицательные.

С некоторой долей условности среди огромного количества работ по данной проблеме можно выделить два основных направления. Первое – это замещение значительной (до 40 %) доли фенола смесью фенольных фракций, образующихся при пиролизе древесных отходов (коры, щепы и т.д.). При такой модификации существенно повышается экологичность связующего (на 16-22 % повышается плотность сшивки от-

вержденного материала), незначительно – разрывная прочность (на 2-3 %) и разбухаемость (на 7-8 %), но снижается жесткость (на 4-5 %) [1]. Как показала практика, подобные модифицированные связующие имеют хорошие перспективы для производства плитных изделий (ДСП, ДВП, OSB) и клееной фанеры.

Второе направление – более глубокая модификация ФФС, подразумевающая существенное изменение структуры отвержденной матрицы. При этом, существенным моментом является стоимость модифицированного связующего. Важно, чтобы в процессе модификации не потерялось одно из основных конкурентных преимуществ ФФС – доступность по цене.

Кроме ценового фактора выбор модификатора обусловлен набором требуемых свойств результирующего связующего, которые, в свою очередь, определяются назначением и условиями эксплуатации материалов. Применительно к пластикам конструкционного и триботехнического назначения это, прежде всего: высокая ударная вязкость, адгезионная и когезионная прочность в сочетании с повышенной релаксационной способностью, термостойкостью и износостойкостью. Дополнительно – модифицированная смола должна обладать малой усадкой и сниженной токсичностью в отвержденном состоянии.

Результаты исследований

В части повышения ударной вязкости и модуля упругости наиболее исследованы эпоксидные модификаторы, а также добавки термопластов. Однако, общим недостатком в этом случае является снижение термостойкости матрицы, а также снижение первоначально высокой водостойкости при длительной эксплуатации (особенно во влажных условиях при повышенных температурах) вследствие УФ-старения.

Заметим, что при использовании термина «ФФС, модифицированная эпоксидами» следует понимать, что фактически происходит модифицирование эпоксидной смолы фенолформальдегидной, поскольку, как показала практика [2], при превышении содержания ФФС в составном связующем более чем 30-35 % происходит разрыхление пространственной сетки полимера, ослабление сил межмолекулярного взаимодействия и, как результат, существенная потеря адгезионных и прочностных свойств. Соответственно, стоимость такого связующего, как и исходного эпоксидного, достаточно высока (в 3,5-5 раз выше, чем у ФФС).

Добавление ФФС увеличивает технологичность эпоксидной смолы (позволяет проводить отверждение без применения отвердителя – необходим только лишь нагрев), увеличивает жесткость отвержденной матрицы, улучшает ее антифрикционные свойства. При этом, сохраняются изначально высокие адгезионные свойства эпоксидной основы, но снижается ударная прочность и повышается степень усадки при отверждении.

Если сравнивать с бакелитовыми лаками, то пропитывающая способность фенолформальдегидно-эпоксидных (Ф-Э) связующих ниже, вследствие их более высокой вязкости. Кроме того, присутствие сильной щелочи, неизбежно остающейся после реакции поликонденсации смол в присутствии щелочных катализаторов, не нейтрализуемых до конца последующей промывкой слабыми растворами кислот, делает такую матрицу коррозионно активной. Например, при использовании в конструкциях с элементами из нержавеющей стали или алюминия, заключенными в такой полимер (т.е. в условиях ограниченного доступа кислорода, необходимого для образования защитных оксидных пленок), подобные элементы быстро разрушаются. Также следует учитывать, что незащищенная лаковыми покрытиями эпоксидная смола достаточно быстро стареет от УФ-излучения: по истечении всего лишь шести месяцев нахождения под солнеч-

ным светом начинается ее распад, сопровождающийся мелением и разрушением с потерей всех физических свойств. Сказанное, пусть и в меньшей степени, относится и к Ф-Э смолам.

Сравнительно менее изучена модификация ФФС полиорганосилоксанами. Практически нет данных о поверхностной усталости таких материалов при длительных циклических нагрузках и при абразивном изнашивании, а также стабильности свойств (в частности, механической прочности и водостойкости) при длительной эксплуатации как в агрессивных средах, так и в условиях УФ-излучения, повышенной влажности и температуры или при их периодическом сезонном изменении.

Предпосылкой использования нами полиорганосилоксанов в качестве модификатора ФФС явились следующие их свойства: высокая термостойкость и устойчивость к старению, высокая эластичность (в том числе и при низких температурах), низкое поверхностное натяжение, гидрофобность, высокая поверхностная активность.

В результате взаимодействия силанольных групп SiOH кремнийорганической смолы с гидроксильными группами смачиваемой поверхности (например, древесных частиц) происходит ориентация кремнийорганических молекул в пленке связующего: органический радикал ориентируется в сторону окружающей среды, а связь -Si-O- — к поверхности древесины, в результате чего образуется защитная водоотталкивающая пленка [3].

Вследствие низкого поверхностного натяжения пленки кремнийорганического полимера, а также высокой активности ее поверхности следует ожидать повышения смачивающей способности фенолформальдегидно-кремнийорганического (Ф-К) связующего по сравнению с ФФС по отношению к армирующим волокнам.

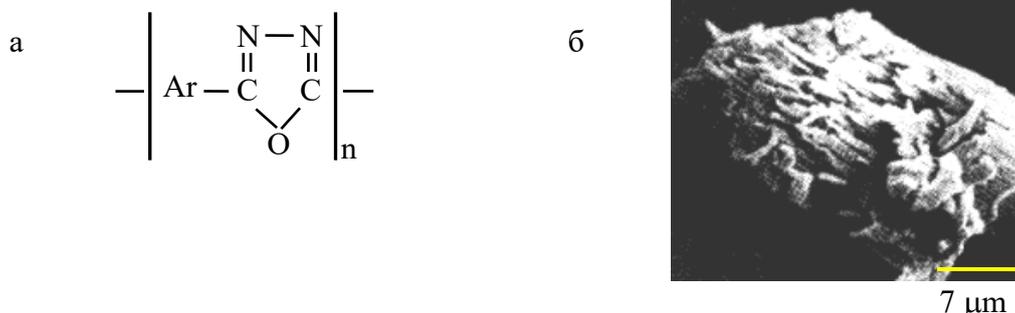
Высокая термостойкость кремнийорганического полимера, содержащего в качестве органического радикала фенильные группы, обусловлена высокой энергией связей Si-O и Si-C₆H₅ (370 и 310 кДж/моль соответственно). Пленка такого полимера (в частности, выбранная нами в качестве модификатора смола К-9Б) полностью сохраняет свои свойства после продолжительной выдержки при температуре 250 °С, при этом теряется только ее блеск. Учитывая высокую совместимость К-9Б по органическому радикалу (фенольному кольцу) с ФФС, мы полагали сохранение такой же термостойкости и в составном Ф-К связующем.

Практически не исследованы адгезионные свойства Ф-К связующих, нет сведений об их эффективности в качестве матрицы композитов, армированных арселоновыми (АВ) и углеродными графитизированными волокнами (УВ). Указанные волокна обладают рядом уникальных свойств, позволяющих создавать материалы, сочетающие высокую прочность как при статических, так и при динамических (включая ударные) нагрузках с повышенной термо- и износостойкостью.

Арселоновые волокна производятся из полимеров, содержащих ароматические и 1-, 3-, 4-оксадиазольные циклы (рисунок 1а). В РФ они зарегистрированы под торговой маркой Арселон®.

Волокно имеет плотную структуру из высокопрочных кристаллических фибрилл, соединенных водородными связями. Высокая жесткость макромолекул волоконнообразующего полимера (ароматического полиамида) затрудняет межфибриллярный переход цепей, следствием чего является продольная расщепляемость микрофибрилл со значительной затратой энергии на преодоление межмолекулярного взаимодействия. В результате, арселоновые волокна при воздействии высоких динамических нагрузок не разрываются (не ломаются), а расщепляются (рисунок 1б), мгновенно релаксируя пиковые нагрузки, они нечувствительны к концентраторам напряжений. Множественность актов разрушения фиксируется акустической эмиссией, уровень которой более чем в

3 раза выше, чем при разрушении углеродных волокон [4]. Такой характер разрушения волокна обуславливает его высокую стойкость к ударному и усталостному нагружению.



а – формула волокна; б – расщепление волокна под нагрузкой

Рисунок 1 – Арселоновое волокно

Арселоновые волокна отличаются:

- высокая термостойкость: позволяет эксплуатировать изделия при температуре 250 °С сроком до 3 лет, кратковременно изделия выдерживают температуру до 400 °С, при этом волокна практически не усаживаются и не плавятся;

- высокое сопротивление усталости и незначительная ползучесть (0,2 %): при усталостных испытаниях на базе 10^7 циклов показатели прочности композита, армированного АВ, на 25 % выше, чем у армированного стекловолокном;

- сохранение эластических свойств при низких и высоких температурах и, в отличие от углеродного или стекловолокна, высокая устойчивость к внешним механическим воздействиям (к двойным изгибам до 60000-200000 циклов, к истиранию – до 30000-60000 циклов, перерезать арселоновый трос без применения специальных средств практически невозможно);

- низкий коэффициент трения по металлу (0,04-0,1) в сочетании со способностью образовывать износостойкую поверхность трения (за счет включения граничных слоев в процесс трибопревращений и формирования на поверхности «трибохимической» смазки) позволяют использовать волокно в качестве армирующего наполнителя (вместо асбеста) в композиционных материалах для изготовления изделий триботехнического назначения: тормозных накладок для грузовиков; «сухарей» и «скользунов» железнодорожных вагонов; подшипников на прокатных станах и т.п. (при этом значительно уменьшается износ металлического контртела);

- высокая химическая стойкость (волокно устойчиво к действию органических кислот и растворителей, нефтепродуктов, минеральных масел, умеренно устойчиво к действию разбавленных неорганических кислот и щелочей при температуре до 100 °С) и гидролитическая стабильность (сохраняет 50 % исходной прочности при кипячении в 10 %-ом растворе щелочи в течение 24 ч);

- хорошая адгезия к связующим.

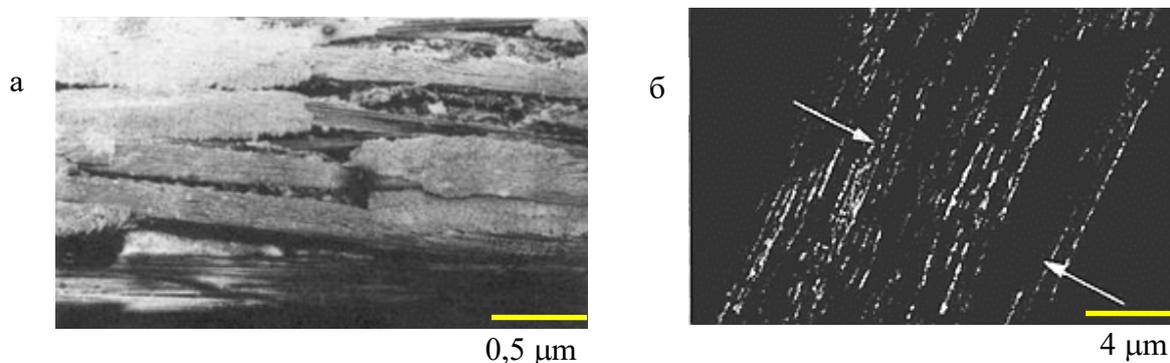
Важным свойством арселоновых нитей является дискретность их структуры. Каждая нить состоит из множества тонких моноволокон (филаментов), что определяет высокую стойкость нитей к многократным изгибающим нагрузкам. В целом, использование арселоновых волокон при армировании древесных пластиков существенно повышает их ударную вязкость, сдвиговую, разрывную, усталостную прочность, абразивную и термостойкость.

К недостаткам арселенового волокна, как армирующего наполнителя, следует отнести высокую гигроскопичность (10-11 %) и значительное снижение прочности при влагопоглощении (на 40 % при 5 % влагопоглощении).

В качестве армирующих УВ нами использовались отходы нитей и тканей из графитизированного углеродного волокна марки «Урал» производства РУП «СВЕТЛОГОРСКОЕ ПО «ХИМВОЛОКНО», получаемого из вискозных волокон путем многостадийной термической обработки при высоких температурах (2000 °С и выше).

Достаточно высокая энергия связи С-С (245 кДж/моль) УВ позволяет ему сохранять прочность в широком диапазоне температур, обуславливает устойчивость к термическому старению и высокую усталостную прочность (в 2-3 раза выше, чем у стекловолокна).

Элементарное волокно имеет высокоупорядоченную многослойную структуру из тончайших ориентированных вдоль оси волокна кристаллических микрофибрилл, соединенных аморфными участками диаметром 1-2 нм (рисунок 2а). Между микрофибриллами имеются поры (занимающие до 30 % объема волокна), неизбежно возникающие из-за его усадки на всех этапах его окисления при производстве.



а – большие кристаллиты в структуре волокна; б – разрушенные в результате межслоевого сдвига микрокристаллиты (показаны стрелками)

Рисунок 2 – Микрофотография графитизированного углеродного волокна

Отличительные особенности волокон марки «Урал»:

- повышенная эластичность в сочетании с высокой прочностью на разрыв и модулем упругости;
- высокая теплостойкость и устойчивость к термическому старению, предельно низкий коэффициент термического расширения;
- высокое статистическое и динамическое сопротивление усталости при нормальной и очень низкой температуре;
- высокая химическая и водостойкость;
- отличные антифрикционные свойства (низкий коэффициент трения, высокая тепло- и электропроводность).

К недостаткам данных волокон, при использовании их в качестве армирующих, следует отнести:

- плохую смачиваемость связующим вследствие низкой поверхностной энергии (требует дополнительной обработки поверхности волокна для увеличения степени активирования по содержанию карбоксильной группы);
- малую межслоевую прочность при сдвиге, не превышающую 14-28 МПа, (рисунок 2б). Для повышения этого показателя до уровня 70 МПа необходимо окисление

или галогенирование поверхности волокон, а также использование их в композиции с другим типом волокон, имеющих повышенную сдвиговую прочность;

- значительное снижение химстойкости в среде сильных окислителей и галогенов (особенно при повышенных температурах);

- меньшая, по сравнению со стекловолокном, удельная ударная вязкость, недостаточная трещиностойкость и более высокая чувствительность к концентрации напряжения (необходимы защитные покрытия от абразивных воздействий).

При разработке оптимального состава армирующих волокон, учитывая существенное отличие их свойств, мы исходили из следующих предпосылок.

В качестве основного армирующего элемента целесообразно принять АВ – они позволяют реализовать в материале достаточно высокую прочность на разрыв и ударную прочность, а также предотвратить его ползучесть под нагрузкой. Кроме того, они способны формировать в готовых изделиях при трении износостойкие поверхности с низким (в пределах 0,04-0,1) коэффициентом трения.

Графитизированные углеродные волокна эффективны в качестве вспомогательных компонентов, вводимых в состав для снижения электризуемости материала, повышения усталостной прочности, формирования в его монолите пространственной структуры с высокой теплопроводностью (предотвращение коробления изделий при изменении температуры вследствие неравномерного ее распределения по сечению), а также (в случае изделий триботехнического назначения) – дополнительного снижения коэффициента трения.

Нами были проведены сравнительные испытания образцов древеснонаполненных композитов, комбинированно армированных арселеновыми и углеродными волокнами, отличающихся видом использованного модификатора: кремнийорганическая смола (К-9Б) или эпоксидная смола (ЭД-20). Целью исследований было определение сравнительной эффективности модификации ФФС указанными модификаторами. В качестве критериев оценки были выбраны: ударная вязкость, температурный диапазон эксплуатации, износостойкость, химическая и водостойкость, причем, не просто высокие показатели требуемых свойств, но и их сохранение при длительной эксплуатации в сложных условиях. Например, для внутренних труб из древесного пластика в составе многослойных труб технологических трубопроводов – это воздействие химически агрессивной транспортируемой среды с возможным включением абразивных частиц при повышенной влажности и температуре; для изделий триботехнического назначения (корпуса роликов шахтных ленточных конвейеров) – повышенная температура поверхности трения в сочетании с возможным абразивным и усталостным износом.

Составное Ф-Э связующее приготовили в следующей последовательности: смесь бакелитового лака (ЛБС-3) и раствора гидроксида калия в изопропиловом спирте загружали в реактор, оборудованный термостатом и миксером с электроприводом, и нагревали до 50 °С с постоянным перемешиванием. Затем добавляли раствор ЭД-20 в изопропиловом спирте и с постоянным перемешиванием выдерживали смесь в течение 6 часов, поддерживая температуру в пределах 50-55 °С. Прореагировавшую смесь нейтрализовали 10 %-ым раствором уксусной кислоты, промывали водой и вакуумировали при 45 °С. Соотношение загружаемых в реактор компонентов было следующим (в мас. ч.): ЛБС-3 – 100; кремнийорганической смолы (КОН) – 21; изопропиловый спирт – 360; ЭД-20 – 220.

Процесс приготовления Ф-К связующего технологически был существенно проще: обычное смешение смол (ЛБС-3 и К-9Б в соотношении 3:1) при 20 °С.

При этом, силанольные SiOH группы кремнийорганической смолы участвовали в образовании химических связей с функциональными группами ФФС (прежде всего с

ОН группами), образуя сшитую структуру из фенольных колец, соединенных друг с другом метиленовыми мостиками, фрагментами $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ и $-\text{CH}_2-\text{O}-\text{CH}_2-$ (как и в немодифицированной ФФС), а также $-\text{CH}_2-\text{O}-\text{Si}$ (по сравнению с ФФС зафиксировано появление новой полосы поглощения $1071,8 \text{ см}^{-1}$).

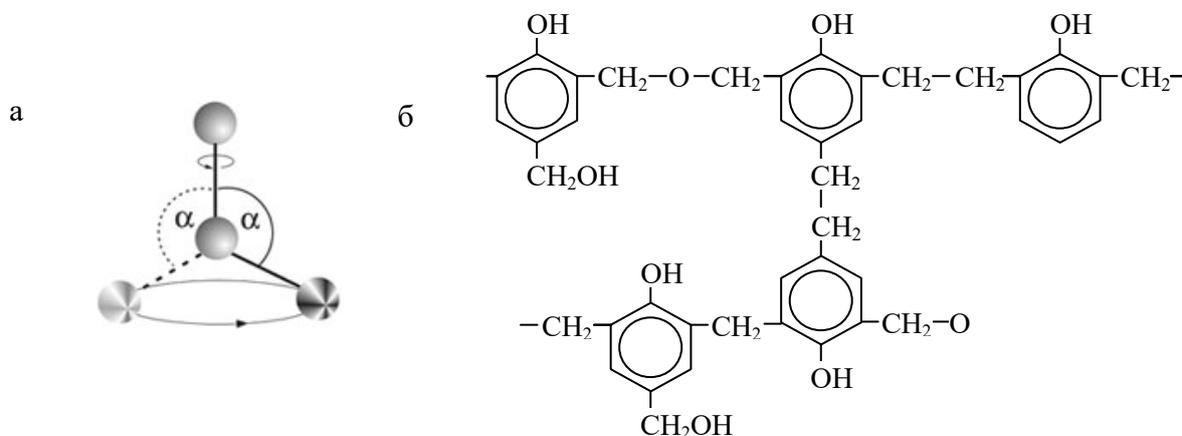
По отношению к АВ оба исследуемых составных связующих показали высокие смачивающие свойства: пленка полимера равномерно покрывала волокно; в случае УВ для повышения их поверхностной активности волокно предварительно обрабатывали поливиниловым спиртом.

Следует отметить особенность формирования пленки Ф-К связующего на поверхности древесины: зафиксировано снижение интенсивности полос поглощения метилольных и фенольных гидроксильных групп, включенных в межмолекулярную водородную связь (ν_{OH} : $3329, 3244 \text{ см}^{-1}$) ($\text{C}_6\text{H}_5-\text{OH}\cdot\text{X}$, $\text{CH}_2-\text{OH}\cdot\text{X}$, где X – атом кислорода поверхности древесины или армирующего волокна), с сопутствующим снижением интенсивности полосы валентных колебаний связи С-О (ν_{CO} : $1023, 1231 \text{ см}^{-1}$) и появлением полос поглощения (ν_{OH} : $3435, 3450 \text{ см}^{-1}$) силанольных ОН групп, связанных по водороду ($\text{Si}-\text{OH}\cdot\text{X}$). То есть, поверхность древесных частиц или армирующих волокон непосредственно связывается преимущественно с макромолекулами кремнийорганического полимера, которые, в свою очередь, пространственно сшиты с макромолекулами ФФС в единую структуру. Поскольку такая прослойка с преимущественным содержанием кремнийорганической смолы обладает повышенной эластичностью, то в композите устраняется один из существенных недостатков, присущих фенолформальдегидным связующим – адгезионное разрушение композита по местам соединения армирующих волокон и/или древесных частиц с полимером матрицы вследствие недостаточной способности отвержденной ФФС деформироваться без разрушения при ударных нагрузках. При этом, существенным моментом является толщина данной прослойки – она должна быть минимальной, поскольку иначе, вследствие недостаточной механической прочности кремнийорганической смолы (КОС), возможно снижение прочности адгезионной связи.

Так, проведенные нами исследования показали, что для ФФС, модифицированной КОС, оптимальная толщина пленки составляет 21-29 мкм (в зависимости от соотношения ФФС и КОС). При превышении данного значения наблюдалось интенсивное порообразование вследствие освобождения спирта в зоне плавления перерабатывающего оборудования (плунжерного экструдера). Кроме того, при продолжительном воздействии (48 часов) высоких температур ($120 \text{ }^\circ\text{C}$) повышенная толщина прослойки полимера (30-35 мкм) приводила к снижению ее гибкости и как следствие – ударной прочности образцов (на 44 %). При меньшей толщине (17-20 мкм) прочность образцов резко снижалась (прочность на изгиб и растяжение – на 55-67 %, ударная вязкость – в 1,7 раза), что можно объяснить недостаточным количеством водородных связей, соединяющих поверхность армирующих волокон и древесных частиц с полимером, что подтверждалось результатами ИК спектроскопии – уменьшением интенсивности полосы поглощения гидроксильных групп, включенных в водородную связь ($3550-3200 \text{ см}^{-1}$), и увеличением интенсивности полосы поглощения свободных гидроксильных групп ($3700-3584 \text{ см}^{-1}$).

Описанную выше особенность формирования пленки Ф-К связующего на поверхности древесных частиц или армирующих волокон можно объяснить следующим. Как известно [3, 5], структура основной цепи макромолекулы полиорганосилоксанов представлена последовательностью $-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-$. Валентные углы, образованные валентностями, связывающими атом кремния Si с двумя атомами кислорода О, вследствие теплового движения имеют определенную свободу вращения по конусу вокруг соот-

ветствующей валентной связи, ограниченную аналогичными соседними конусами вращения (рисунок 3а).



а – возможные конформации связи Si-O кремнийорганического полимера;

б – структура отвержденной ФФС

Рисунок 3 – Конформационная гибкость полимеров

Степень гибкости макромолекулы зависит от величины энергии вращения, необходимой для поворота каждого звена. В [5] было показано, что для полиорганосилоксанов соответствующая энергия вращения в три-четыре раза ниже, чем у ряда других органических полимеров. Благодаря этому, гидроксильные группы, связанные с атомами Si, обладают гораздо большей пространственной свободой, по сравнению, например, с такими же группами фенольного кольца или метилольных групп, и поэтому, имеют преимущество при образовании водородных связей с поверхностью субстрата. Кроме того, повышенная конформационная гибкость обуславливает и способность кремнийорганического полимера к ограниченным эластичным деформациям.

Исследования проводили с образцами, изготовленными по методу плунжерной экструзии [6] из пресс-композиции, содержащей (в мас. %): измельченную древесину – 51,5; арселонное и углеродное графитизированное волокно в виде измельченных отходов (пуганки) – 12 и 5 соответственно; связующее – 28; поливинилбутираль – 0,5; поливиниловый спирт – 2,5; мочевины – 0,2; стеарат алюминия – 0,3.

В качестве связующего использовали ФФС (ЛБС-3), модифицированную кремнийорганической смолой К-9Б (в соотношении 3:1) или ЭД-20 (в соотношении 1:2,3).

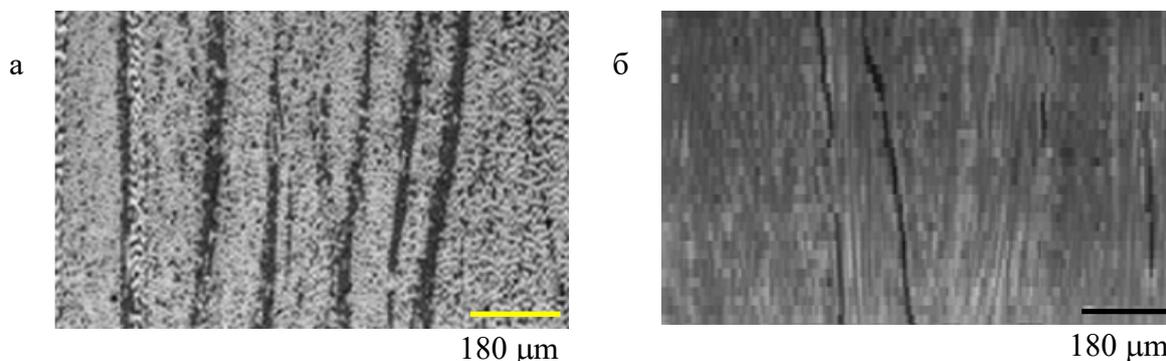
ИК исследования проводили на ИК-Фурье спектрофотометре Vertex-70 (Bruker). Образцы для исследований приготавливали в виде суспензии 10 мг твердого вещества композита с 2 каплями вазелинового масла. Степень сшивки определяли в аппарате Со-кслета, в качестве растворителя использовали 10 %-ый водный раствор серной кислоты.

Заметим, что для отвержденной фенолформальдегидной смолы характерна периодическая сетчатая структура (рисунок 3б), причем возможность конформационных колебаний при нагреве (в том числе и от ударных нагрузок) незначительна, что и обуславливает низкую ударную прочность полимера (6-8 кДж/м²). Структура на рисунке 3б отличается от общепринятой «идеальной» структуры отвержденной ФФС в виде фенольных колец соединенных метиленовыми мостиками и более соответствует реальным полимерам, в частности, в [7] показано наличие химического сдвига 44-38 и

38-30 м.д., относящегося к резонансу атомов углерода метиленового мостика и фрагмента $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$, и 69-60 м.д. – для фрагмента $-\text{CH}_2-\text{O}-\text{CH}_2-$.

Нами были проведены триботехнические испытания образцов на Ф-Э и Ф-К связующих относительно их способности сопротивляться усталостному и абразивному износу при трении. В [8, 9] была показана общность природы разрушения при циклическом и фрикционном нагружении, поэтому для моделирования ускоренного усталостного разрушения (снижения сопротивления поверхностной усталости) при трении мы предварительно подвергали образцы воздействию циклической нагрузки на изгиб (50 тыс. циклов нагрузки) величиной 60 % соответствующей предельной прочности материала.

Последующие триботехнические испытания проводили на машине трения: 8 км трения образцов по стали 45 (схема «вал – частичный вкладыш») при нагрузке 0,1 МПа и скорости 0,57 м/с и затем 1,5 км трения по абразивной шкурке (Р320) при нагрузке 0,06 МПа и скорости 0,42 м/с. Последующие микроскопические исследования образцов показали существенно более высокую износоустойчивость образцов с матрицей из Ф-К связующего по сравнению с Ф-Э смолой (рисунок 4).



а – матрица из Ф-Э полимера; б – матрица из Ф-К полимера

Рисунок 4 – Микрофотографии поверхности образцов композита после испытаний на машине трения

В [8, 9] было показано, что для поверхностей трения композитов на эпоксидных или фенолформальдегидных связующих в результате усталостного износа возникают микротрещины, расположенные перпендикулярно направлению скольжения. Механизм их образования следующий: знакопеременные деформации материала в зонах контакта приводят к росту температуры и к ее локализации в отдельных микрообъемах вследствие низкой теплопроводности полимера. Последующие циклические нагрузки вызывают появление дефектов. Концентрация напряжений на них ускоряет разрыв связей в прилегающих областях и способствует образованию и развитию микротрещин.

Абразивный износ проявляется в вырываниях микрообъемов материала.

Как видно из рисунка 4б, поверхность композита с Ф-К матрицей после испытаний существенно отличается от поверхности с материалами на Ф-Э или фенолформальдегидном связующем: практически отсутствуют поперечные трещины, характерные для усталостного износа, и множественные вырывания материала, характерные для абразивного износа.

Полученные результаты высокой износостойкости усталостному и абразивному износу композита на Ф-К связующем можно объяснить сочетанием следующих факторов:

- повышением степени сшивки матрицы с 63 до 85 %:
 - по сравнению с контрольными образцами на фенолформальдегидном связующем зафиксировано увеличение интенсивности полос поглощения валентных колебаний 2962, 2853 см^{-1} и деформационных колебаний 1464 см^{-1} связи С-Н метиленовых мостиков и фрагментов $\text{CH}_2\text{-CH}_2$, связывающих фенольные кольца в сшитую структуру;
 - сокращена доля свободного фенола с 8 до 4,2 % ($D_{690}/D_{1235} = 0,038$, где D_{690} и D_{1235} – оптические плотности, соответствующие внеплоскостным деформационным колебаниям фенольного ядра (695 см^{-1}) и колебаниям связи С-О гидроксильной группы, связанной с фенольным ядром (1235 см^{-1}) [10]);
 - практически отсутствует полоса 1675-1750 см^{-1} , характерная для С=О связи карбонильной группы непрореагировавшего формальдегида;
- повышением термостойкости – зафиксировано существенное снижение интенсивности полосы поглощения 1700-1750 см^{-1} , соответствующей частичному окислению полимера;
- повышением модуля упругости.

Выводы

В результате модификации ФФС порлиорганосилоксаном с фениловым радикалом в боковой цепи (кремнийорганическая смола К-9Б) возможно существенное улучшение ударной прочности отвержденного полимера, а также повышение смачивающей способности смолы к армирующим волокнам. При этом, при условии оптимального соотношения ФФС к К9-Б (от 3:1 до 5:1) адгезионная прочность контакта «волокно – матрица» практически не изменяется. Сопутствующими эффектами такой модификации являются повышение степени сшивки полимера и, как результат – снижение доли свободного фенола и формальдегида в отвержденной смоле, повышение термо- и водостойкости.

По сравнению с ФФС, модифицированной эпоксидной смолой, образцы древеснонаполненных композитов, комбинированно армированных арселеновым и углеродным графитизированным волокном, показали значительно более высокую устойчивость к поверхностной усталости при циклическом нагружении и более высокую стойкость к абразивному износу.

Список использованных источников

1. **Nakos, P.** Wood Adhesives Made with Pyrolysis Oils / P. Nakos, S. Tsiantzi, E. Athanassiadou // PyNe Newsletter, Aston University, Birmingham, UK. – 2000. – Vol. 10. – P. 10-11.
2. **Пахаренко, В.А.** Переработка полимерных композиционных материалов / В.А. Пахаренко, Р.А. Яковлева, А.В. Пахаренко. – Киев: Воля, 2006. – 552 с.
3. **Семенов, В.В.** Получение, свойства и применение олигомерных и полимерных органосиланов / В.В. Семенов // Успехи химии. – 2011. – № 4. – С. 335-361.
4. **Перепелкин, К.Е.** Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты / К.Е. Перепелкин. – М.: Научные основы и технологии, 2009. – 658 с.
5. **Соболевский, М.В.** Свойства и области применения кремнийорганических продуктов / М.В. Соболевский, О.А. Музовская, Г.С. Попелева. – М.: Химия, 1975. – 296 с.

6. Способ изготовления погонажного изделия из пресс-композиции на основе древесины: пат. 13523 Респ. Беларусь, МПК В 27N5/00 / Ю.Д. Терешко, А.Н. Екименко, С.Н. Колдаева, О.Ю. Колдаев; заявитель УО «Белорусский государственный университет транспорта». – № а 20060333; заявл. 12.04.2006; опубл. 30.08.2010 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 4. – с. 85.

7. **Калабин, Г.А.** Количественная спектроскопия ЯМР природного органического сырья и продуктов его переработки / Г.А. Калабин, Л.В. Каницкая, Д.Ф. Кушнарев. – М.: Химия, 2000. – 408 с.

8. The genesis of friction / N.P. Su, N.-C. Sin // Wear. – 1981. – V. 69. – № 1. – P. 94-114.

9. Структура и свойства композиционных материалов / К.И. Портной [и др.]. – М.: Машиностроение, 1979. – 255 с.

10. Способ количественного определения свободного фенола в фенолоальдегидных смолах: а.с. 1833805 СССР / А.Л. Зайцев; заявитель Институт механики металлополимерных систем АН БССР, опубл. 15.08.93.

Ekimenko A.N.

Comparative efficiency of phenolformaldehyde pitches modification by epoxides and polyorganosiloxanes in wood plastics matrixes

The paper considers efficiency of usage of polyorganosiloxane and epoxide modifiers of phenolformaldehyde pitch (PFP) regarding to the increase of its impact strength and wetting ability to reinforcing fibres, stability to surface fatigue at cyclic loads and to abrasive wear. Features of PFP interactions with organosilicon pitch indicating raised thermo- and water resistance of the compound binding, and also the decrease in the amount of free phenol and formaldehyde in a hardened material are described.

Поступила в редакцию 22.11.2013 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.