

Учредитель: Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

**Главный редактор**

КАНТОВИЧ Л.И., д.т.н., проф.

**Зам. гл. редактора:**

ИВАНОВ С.Л., д.т.н., проф.

ЛАГУНОВА Ю.А., д.т.н., проф.

**Редакционный совет:**

КОЗОВОЙ Г.И., д.т.н.

(сопредседатель)

ТРУБЕЦКОЙ К.Н., акад. РАН, д.т.н.

(сопредседатель)

АНТОНОВ Б.И.

ГАЛКИН В.А., д.т.н.

КОЗЯРУК А.Е., д.т.н., проф.

КОСАРЕВ Н.П., д.т.н., проф.

МЕРЗЛЯКОВ В.Г., д.т.н., проф.

НЕСТЕРОВ В.И., д.т.н., проф.

ЧЕРВЯКОВ С.А., к.т.н.

**Редакционная коллегия:**

АБРАМОВИЧ Б.Н., д.т.н., проф.

АНДРЕЕВА Л.И., д.т.н.

ГАЛКИН В.И., д.т.н., проф.

ГЛЕБОВ А.В., к.т.н.

ЕГОРОВ А.Н. (Белоруссия)

ЖАБИН А.Б., д.т.н., проф.

ЗЫРЯНОВ И.В., д.т.н.

МУХОРТИКОВ С.Г.

МЫШЛЯЕВ Б.К., д.т.н., проф.

ПЕВЗНЕР Л.Д., д.т.н., проф.

ПЕТРОВ В.Л., д.т.н., проф.

ПЛЮТОВ Ю.А., к.т.н., доц.

ПОДЭРНИ Р.Ю., д.т.н., проф.

САМОЛАЗОВ А.В.

СЕМЕНОВ В.В., к.т.н.

СТАДНИК Н.И. (Украина), д.т.н., проф.

ТРИФАНОВ Г.Д., д.т.н., доц.

ХАЗАНОВИЧ Г.Ш., д.т.н., проф.

ХОРЕШОК А.А., д.т.н., проф.

ЮНГМЕЙСТЕР Д.А., д.т.н., проф.

**Редакция:**

БЕЛЯНКИНА О.В.

ДАНИЛИНА И.С.

**Телефон редакции:**

(499) 269-53-97

**Факс:** (499) 269-55-10

**Email:** gma@novtex.ru

**http://novtex.ru/gormash**

## СОДЕРЖАНИЕ

### ПОДЗЕМНЫЕ РАБОТЫ

**Шишлянников Д. И., Чекмасов Н. В., Трифанов М. Г., Габов В. В., Иванов С. Л., Асонов С. А.** Повышение эффективности эксплуатации проходческо-очистных комбайнов калийных рудников на основе анализа записей регистраторов параметров . . . . . 3

**Пушкарев А. Е., Король В. В., Хачатурян В. Г.** Анализ технической возможности реализации струговой выемки . . . . . 10

### БУРОВЫЕ РАБОТЫ

**Бугаев В. Г., Ереско С. П., Бугаев И. В.** Анализ эффективности проходки скважин в мерзлых грунтах бурильно-крановыми машинами, оснащенными инструментом с различными режущими элементами . . . . . 14

### ГОРНЫЙ ТРАНСПОРТ

**Крупник Л. А., Шапошник Ю. Н., Шапошник С. Н.** Перспективные направления транспортирования закладочной смеси в шахту на горно-добывающих предприятиях Казахстана . . . . . 21

**Зырянов И. В., Мартынова Г. А.** Оценка возможности повторного использования отработанных масел в АК "Алроса" (ОАО) и выбор способов обращения с отходом в сложившихся условиях хозяйствования . . . . . 29

### ПОДВОДНАЯ РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

**Александров В. И., Егоров И. В.** Расчет глубины погружения буферной емкости в системах гидроподъема горной массы с морского дна . . . . . 37

### НАУЧНЫЕ РАЗРАБОТКИ

**Жабин А. Б., Аверин Е. А.** Систематизация параметров процесса эрозии горных пород под действием гидроабразивных струй . . . . . 41

### НЕМНОГО ИСТОРИИ

**Волошиновский И. И., Певзнер Л. Д.** Идея создания электропривода переменного тока для горных машин по В. С. Тулину (К 110-летию выдающегося электротехника — профессора Вячеслава Семеновича Тулина) . . . . . 45

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, и входит в систему Российского индекса научного цитирования.

## ГОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

**Editor-in-Chief**

KANTOVICH L.I., Dr. Sci. (Tech.)

**Deputy Editor-in-Chief:**

IVANOV S.L., Dr. Sci. (Tech.)

LAGUNOVA Yu.A., Dr. Sci. (Tech.)

**Editorial Council:**

KOZOVY G.I. (co-chairman), Dr. Sci. (Tech.)

TRUBETSKOY K.N. (co-chairman),

Dr. Sci. (Tech.), Acad. RAS

ANTONOV B.I.

CHERVYAKOV S.A., Cand. Sci. (Tech.)

GALKIN V.A., Dr. Sci. (Tech.)

KOZYARUK A.E., Dr. Sci. (Tech.)

KOSAREV N.P., Dr. Sci. (Tech.)

MERZLYAKOV V.G., Dr. Sci. (Tech.)

NESTEROV V.I., Dr. Sci. (Tech.)

**Editorial Board Members:**

ABRAMOVICH B.N., Dr. Sci. (Tech.)

ANDREEVA L.I., Dr. Sci. (Tech.)

EGOROV A.N. (Belarus)

GALKIN V.I., Dr. Sci. (Tech.)

GLEBOV A.V., Cand. Sci. (Tech.)

KHAZANOVICH G.Sh., Dr. Sci. (Tech.)

KHORESHOK A.A., Dr. Sci. (Tech.)

MUKHORTIKOV S.G.

MYSHLYAEV B.K., Dr. Sci. (Tech.)

PEVZNER L.D., Dr. Sci. (Tech.)

PETROV V.L., Dr. Sci. (Tech.)

PLYUTOV Yu.A., Cand. Sci. (Tech.)

PODERNI R.Yu., Dr. Sci. (Tech.)

SAMOLAZOV A.V.

SEMENOV V.V., Cand. Sci. (Tech.)

STADNIK N.I. (Ukraine), Dr. Sci. (Tech.)

TRIFANOV G.D., Dr. Sci. (Tech.)

YUNGMEYSTER D.A., Dr. Sci. (Tech.)

ZHABIN A.B., Dr. Sci. (Tech.)

ZYRYANOV I.V., Dr. Sci. (Tech.)

**Editorial Staff:**

BELYANKINA O.V.

DANILINA I.S.

### CONTENTS

#### UNDERGROUND MINING

**Shishlyannikov D. I., Chekmasov N. V., Trifanov M. G., Gabov V. V., Ivanov S. L., Asonov S. A.** Improving the Efficiency of Combines Potash Mines in the Analysis of Records . . . . . 3

**Pushkarev A. E., Korol' V. V., Khachatryan V. G.** Analysis of the Technical Feasibility of the Plow Recess . . . . . 10

#### DRILLING OPERATIONS

**Bugaev V G., Eresko S. P., Bugaev I. V.** Analysis of Efficiency of the Driving of Wells in Frozen Soil by the Boring and Crane Cars Equipped with the Tool with Various Cutting Elements . . . . . 14

#### MINING TRANSPORT

**Krupnik L. A., Shaposhnik Yu. N., Shaposhnik S. N.** Promising Technologies of Backfill Mixture Haulage in Mines of Kazakhstan . . . . . 21

**Zyryanov I. V., Martynova G. A.** Evaluation of Waste Oils Reuse in ALROSA (OJSC) and Selection of Waste Treatment Methods in the Current Economic Conditions . . . . . 29

#### UNDERWATER MINING OF MINERALS

**Aleksandrov V. I., Egorov I. V.** The Calculation of Buffer Vessel Immersion Depth in the Systems of Rock Mass Hydraulic Hoisting from the Seabed . . . . . 37

#### RESEARCH AND DEVELOPMENT

**Zhabin A. B., Averin E. A.** Systematization of Parameter of Rocks Erosion Destruction with Abrasive Waterjet . . . . . 41

#### SOME HISTORY

**Voloshinovskiy I. I., Pevzner L. D.** Alternating Current Drive Idea for Mining Machinery with Invariant Control, According to Tulin V. S. (Devoted to Prof. Vyacheslav Semenovich Tulin 110<sup>th</sup> Anniversary) . . . . . 45

Information about the journal is available online at:  
<http://novtex.ru/gormash>, e-mail: [gma@novtex.ru](mailto:gma@novtex.ru)

УДК 622.232.83

**Д. И. Шишлянников**, канд. техн. наук, доц., **Н. В. Чекмасов**, канд. техн. наук, доц.,  
**М. Г. Трифанов**, мл. науч. сотр., ПНИПУ, г. Пермь,  
**В. В. Габов**, д-р техн. наук, проф., **С. Л. Иванов**, д-р техн. наук, проф., **С. А. Асонов**, асп.,  
НМСУ "Горный", г. Санкт-Петербург

E-mail: 4varjag@mail.ru

## **Повышение эффективности эксплуатации проходческо-очистных комбайнов калийных рудников на основе анализа записей регистраторов параметров**

*Предложен способ контроля параметров работы и обоснована концепция бортового программно-регистрирующего комплекса проходческо-очистных комбайнов "Урал". Представлены результаты экспериментальных исследований величины и характера изменения нагрузок приводов исполнительных органов комбайнов "Урал-20Р". Предложена методика анализа записей регистраторов параметров, обеспечивающая повышение эффективности эксплуатации оборудования механизированных комплексов посредством определения количественных величин, характеризующих технический и технологический уровень организации процесса добычи калийной руды. Представлены критерии оценки эффективности работы инженерных и сервисных служб горно-добывающего предприятия. Описан способ непрерывного автоматизированного контроля выбросоопасности калийного массива.*

**Ключевые слова:** проходческо-очистной комбайн, регистратор параметров, нагруженность приводов, эффективность использования, сервис, контроль технического состояния, повышение безопасности

### **Актуальность задачи разработки и внедрения систем регистрации параметров работы добычных комбайнов калийных рудников**

Для предприятий, осуществляющих добычу калийной руды подземным способом, актуальными остаются задачи повышения эффективности использования выемочных машин механизированных комплексов, увеличения их производительности и

эксплуатационной надежности, снижения материальных затрат на поддержание работоспособности горно-добывающего оборудования, обеспечения безопасного ведения работ в очистных камерах.

В настоящее время на калийных рудниках России наибольшее распространение получили проходческо-очистные комбайны "Урал-20Р" производства ОАО "КМЗ" (г. Копейск, Челябинская обл.), оснащенные комбинированными исполнительными органами и гусеничным ходовым оборудованием. Приводы рабочих органов комбайнов представляют собой совокупность независимых механических трансмиссий (многоступенчатых зубчатых редукторов) с трехфазными асинхронными электродвигателями. Характеристики двигателей, установленных на комбайне "Урал-20Р", приведены в табл. 1.

Проходческо-очистные комбайны "Урал" применяются на калийных рудниках РФ уже более 30 лет и, в целом, характеризуются положительными отзывами персонала инженерно-технических и ремонтных служб предприятий. Однако в ходе эксплуатации данных добычных машин выявлены недостатки, определяющие необходимость даль-

Таблица 1  
Характеристики двигателей комбайна "Урал-20Р"

Назначение	Тип двигателя	Мощность, кВт	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Число, шт.
Привод резовых дисков	ВАО2-315М6	160	1000	2
Привод переносного вращения	2ВР250S4У5	75	1500	1
Привод отбойного устройства	ВРПВ200L4Р	45	1500	1
Привод бермowego органа	2ВР250S4У5	75	1500	2
Привод конвейера	ВРПВ180S4У2,5	22	1500	2
Привод насосной станции	2ВР250S6	45	1000	1
Привод пылеотсоса	ВРПВ180М2У2,5	30	3000	1

нейшего совершенствования их конструкции и повышения надежности. По данным ОАО "Уралкалий" (г. Березники, Пермский край), наибольшей частотой отказов характеризуются электродвигатели относительного вращения резовых дисков, поворотные редукторы планетарно-дисковых исполнительных органов, тихоходные редукторы конвейеров, редукторы и электродвигатели бермовых органов. Причинами возникновения аварийных отказов являются сверхнормативные нагрузки на узлах приводов рабочего оборудования комбайнов, некачественное техническое обслуживание и ремонт, использование добычных машин с полностью выработанным ресурсом. В совершенствовании нуждаются и технологические схемы использования добычных машин.

Комплексное решение задачи повышения эффективности использования добычных машин калийных рудников возможно посредством разработки и внедрения автоматизированных бортовых систем контроля параметров работы и технического состояния проходческо-очистных комбайнов, создания научно обоснованных методик анализа регистрируемых данных. Актуальным направлением научных исследований является также разработка систем автоматического управления и регу-

лирования параметров работы добычных машин, алгоритмов предотвращения аварийных ситуаций и оповещения о недопустимом развитии событий.

### Системы обеспечения безопасной работы и мониторинга технического состояния комбайнов "Урал-20Р"

В настоящее время на рудниках ОАО "Уралкалий" осуществляется опытная эксплуатация систем электрогидравлического управления (СЭУ), дополнительно оснащенных системами мониторинга состояния редукторов и газового контроля комбайнов "Урал". В состав СЭУ (рис. 1) входят датчики измерения концентрации метана в атмосфере очистных выработок, беспроводные датчики измерения температуры и предельного уровня масла в редукторах комбайна, датчики измерения температуры подшипниковых узлов. В магнитной станции комбайна монтируются датчики тока, посредством которых осуществляется контроль нагрузки электродвигателей комбайна. На основе сигналов измерительных трансформаторов тока реализуются защита двигателей от перегрузок и отключение электрооборудования в случае превышения допустимого уровня концентрации ме-

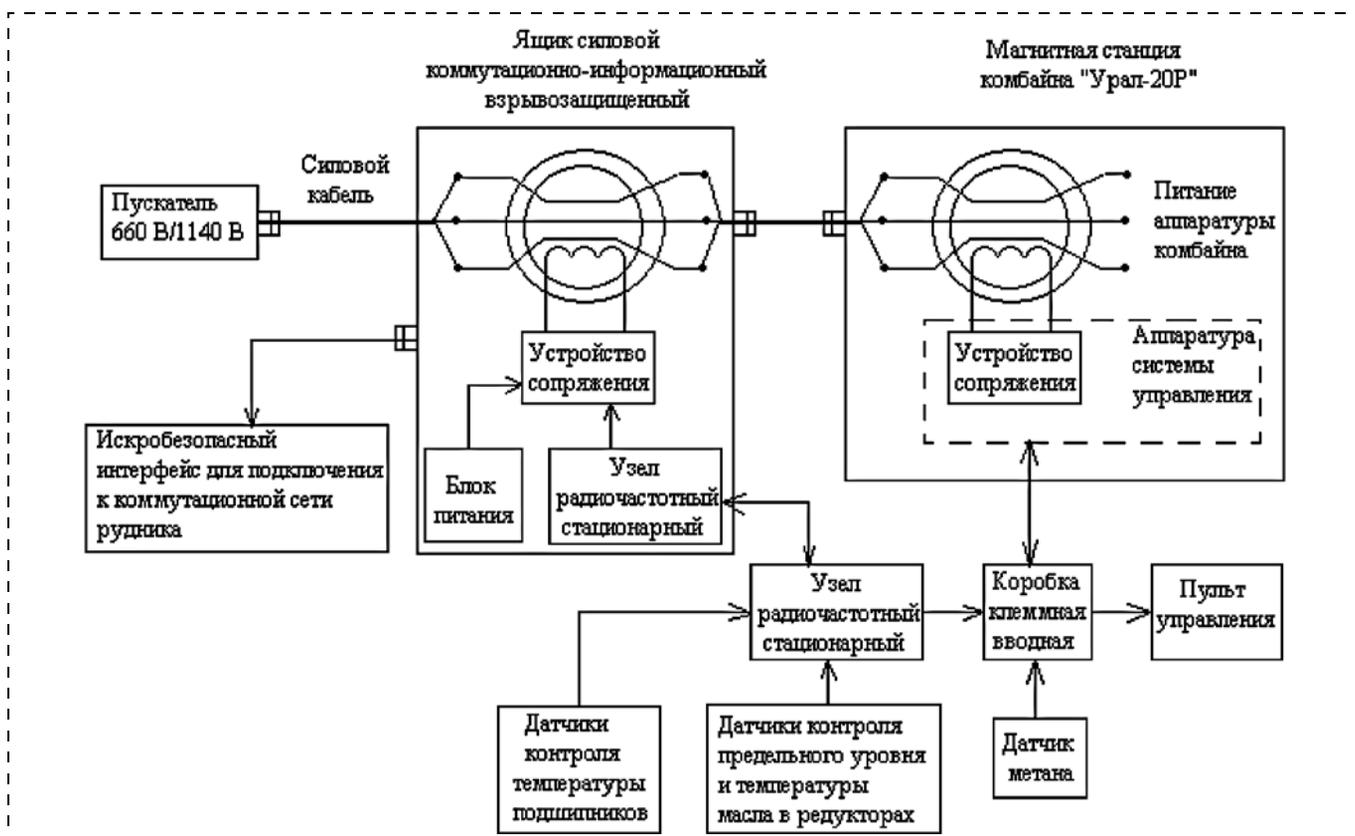


Рис. 1. Структурная схема системы мониторинга состояния редукторов и газового контроля комбайнов "Урал-20Р" [1]

тана в призабойном пространстве. Вся полученная информация с датчиков, включая данные о работе системы управления комбайном, фиксируется в энергонезависимой памяти, соотносена с реальным временем и отображается непосредственно на пульте управления. Особенностью описываемой аппаратуры является возможность передачи информации от комбайна на пульт диспетчера через коммуникационную сеть рудника. Для копирования данных о работе комбайна на персональные компьютеры инженерно-технического персонала предприятия предусмотрены устройства переноса информации на флэш-карты [1].

Указанные системы обеспечивают реализацию контроля температуры подшипниковых узлов и масляных ванн редукторов. Непрерывная запись токов, потребляемых двигателями комбайнов, позволяет определить время использования и некоторые режимные параметры работы добычной машины. Контроль концентрации метана в атмосфере выработки и возможность осуществления связи с диспетчером рудника, безусловно, повышают безопасность ведения добычных работ.

К недостаткам рассмотренных систем следует отнести сложность структуры и малую информативность контролируемых параметров. Известно, что термодинамические методы оценки технического состояния механических трансмиссий малоэффективны вследствие высокой инерционности и неоднородности среды (корпус, валы, подшипники, зубчатые колеса и т. д.). Местные перегревы нивелируются в общем поле температур редукторов. Сама же средняя температура трансмиссии является результирующей двух тепловых потоков: деградиционного, связанного с диссипацией энергии в элементах трансмиссии (своеобразного источника нагрева), и теплового потока от корпуса редуктора в окружающую среду (эффективности охлаждения системы), во многом зависящего от параметров этой среды, наличия загрязнений внешней поверхности редуктора. В свою очередь, установившаяся температура масла зависит от интенсивности охлаждения корпуса редуктора [2]. Низкая эффективность термодинамического мониторинга обуславливает необходимость периодического проведения вибрационного контроля (высокая трудоемкость, затраты времени) приводов комбайна в целях уточнения неисправного состояния отдельных элементов. Большое число датчиков негативно сказывается на стоимости, надежности и удобстве обслуживания бортовых автоматизированных систем горных машин.

Величина и характер изменения токов, потребляемых электродвигателями, весьма опосредованно характеризуют нагруженность приводов комбайнов. Высокая энерговооруженность оборудования механизированных комплексов оказывает существенное влияние на величину питающего напряжения электросети участка. "Просадка" напряжения при неизменной внешней нагрузке обуславливает пропорциональное увеличение тока, потребляемого приводами. По этой же причине низкой эффективностью характеризуются системы автоматического управления, регулирования и защит, основанные только на контроле величин потребляемых токов.

Отсутствие информации о перемещении добычной машины, значениях мгновенной и средней скорости подачи комбайна на забой при анализе записей бортовых регистраторов затрудняет оценку эксплуатационной производительности и эффективности использования технологического оборудования в очистной камере. Наличие датчиков метана не отменяет необходимости осуществления инструментального контроля выбросоопасности калийного массива, вызванной изменением напряженно-деформированного состояния соляных пород при интенсивном ведении очистных работ или в зонах геологических нарушений.

#### **Регистрация параметров работы комбайнов "Урал-20Р" посредством использования программно-регистрающего комплекса "ВАТУР"**

В трудах сотрудников ведущих научно-образовательных учреждений и отраслевых институтов России неоднократно указывалось, что наиболее информативным и просто реализуемым методом контроля режимных параметров работы и повышения безопасности использования добычных машин является контроль нагруженности приводов рабочего оборудования комбайнов, осуществляемый посредством замеров токов, напряжений, активных и полных мощностей, потребляемых электродвигателями [3—6].

Сотрудниками кафедры "Горная электромеханика" Пермского национального исследовательского политехнического университета совместно со специалистами ООО "Региональный канатный центр" (г. Пермь) разработан опытный образец программно-регистрающего комплекса "ВАТУР", обеспечивающего измерение, запись и сохранение основных параметров работы электроприводов горных машин (рис. 2).

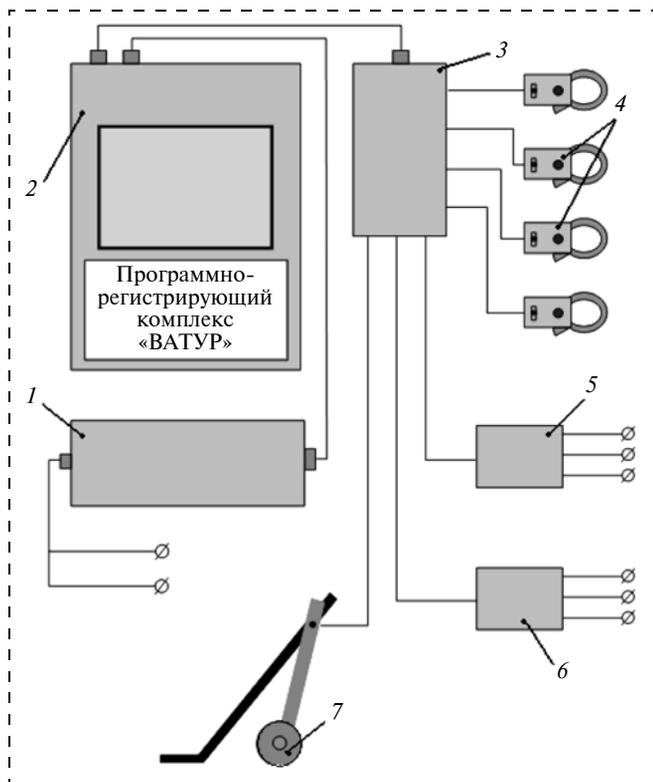


Рис. 2. Структурная схема программно-регистрающего комплекса "ВАТУР":

1 — блок питания; 2 — процессорный блок; 3 — блок коммутации; 4 — датчики тока (токовые клещи); 5, 6 — датчики напряжения; 7 — датчик перемещения

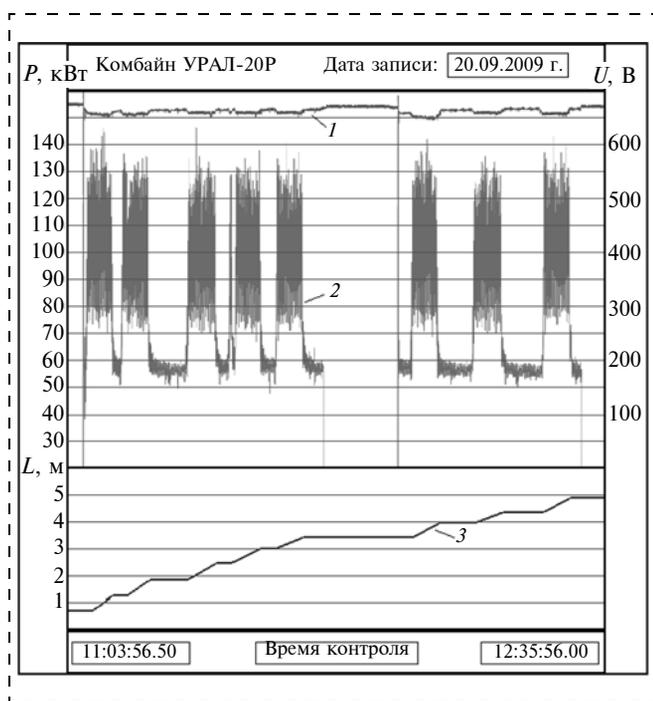


Рис. 3. Визуализация графиков изменения параметров работы комбайна "Урал-20Р" в программе "Ватур-оф" (скорость подачи комбайна на забой  $v_n \approx 7,3$  м/ч):

1 — напряжение питающей сети, В; 2 — активная мощность, потребляемая двигателем относительного вращения резцовых дисков, кВт; 3 — перемещение комбайна, м

В состав измерительного комплекса входят процессорный блок, блоки питания и коммутации, токовые клещи, датчики напряжения и перемещения. Комплекс "ВАТУР" осуществляет 100 измерений в течение одного периода питающей сети 20 мс. Питающее напряжение и нагрузка на асинхронных двигателях рудничных машин имеют симметричный характер, поэтому для измерения активной мощности в трехфазной цепи принят метод одного ваттметра с искусственным нулем. Значения эффективного тока, напряжения, активной и полной мощности определяются по измеренным мгновенным значениям тока и напряжения [7, 8].

Программно-регистрающий комплекс "ВАТУР" обеспечивает возможность создания и хранения массивов данных, содержащих информацию о длительных периодах работы обследуемого горно-шахтного оборудования.

Визуализация полученных данных осуществляется посредством специально разработанной программы "Ватур-оф" (рис. 3).

Процесс формирования нагрузок на элементы приводов добычных комбайнов является случайным и нестационарным. На графике изменения активной мощности, потребляемой электродвигателем относительного вращения резцовых дисков, можно выделить участки запуска, холостого хода, зарубки, установившегося режима работы и отключения комбайна. Изменение нагрузки на приводы обуславливает изменение значения питающего напряжения (кривая 1).

Датчик перемещения, установленный на боковой лыже комбайна, обеспечивает возможность определения скорости подачи на забой и положения добычной машины в выработке (кривая 3).

#### Анализ записей программно-регистрающего комплекса "ВАТУР"

Обработка экспериментальных данных, полученных посредством программно-регистрающего комплекса "ВАТУР", осуществлялась с использованием методов математической статистики и спектрального анализа. На участках установившегося режима работы комбайна рассчитывались средние значения мощности, потребляемой двигателями, удельные энергозатраты процесса разрушения калийного массива, определялись частоты, характеризующие механические колебания в кинематических цепях приводов добычной машины.

Измерения, проведенные на комбайне "Урал-20Р", эксплуатируемом на СКРУ-3, пласт

"Красный-II", показали, что в установившемся режиме работы (когда машинист, ориентируясь на показания индикаторов нагрузки двигателей, не допускает их перегрузки) двигатели комбайна недогружены. Средняя мощность, потребляемая комбайном при скорости подачи  $v_{\Pi} \approx 7,3$  м/ч (производительность — 4,08 т/мин), составила 419,9 кВт при установленной мощности 710 кВт. Загрузка двигателей резцовых дисков составила 106,3 и 114,6 кВт при номинальной мощности 160 кВт, т. е. 66 и 72 % (табл. 2). Остальные приводы имели еще меньшую загрузку. Это связано с тем, что установленные на последних модификациях комбайнов индикаторы загрузки двигателей настроены на мгновенные (пиковые) нагрузки на двигатель. В результате индикатор начинает сигнализировать о перегрузке при фактической нагрузке 60...70 %.

После анализа полученных результатов проведены повторные измерения на том же комбайне со скоростью подачи, увеличенной до  $v_{\Pi} \approx 12,0$  м/ч (производительность — 7 т/мин). Средняя мощность, потребляемая двигателями резцовых дисков за период загрузки бункера-перегрузателя, составила 167,3 и 189,5 кВт, т. е. эти двигатели имели перегрузку на 5 и 18 %. Мощность двигателя верхнего отбойного устройства — 40,9 кВт (91 % от номинальной), двух двигателей бермовых фрез — 165,0 кВт (перегружены на 10 %), двигателя переносного вращения — 43,1 кВт (57,4 % от номинальной загрузки). Таким образом, проведенные измерения показали, что при скорости подачи комбайна  $v_{\Pi} \approx 12,0$  м/ч двигатели привода переносного вращения и отбойного устройства недогружены, в то время как приводы резцовых дисков и бермовой фрезы работают с перегрузкой [8].

Полученные результаты согласуются со статистическими данными по аварийным отказам комбайнов "Урал-20Р". Согласно информации ОАО "Уралкалий" приводы переносного вращения и

отбойного устройства характеризуются наименьшим числом внезапных отказов.

Определенное по ваттметрограмме время работы комбайна в установившемся режиме при отбойке одного вагона руды, отнесенное к величине перемещения, позволяет рассчитать скорость подачи, техническую производительность добычной машины и удельные энергозатраты процесса разрушения калийного массива резцами комбайна

$$v_{\Pi} = L/T_{y.p};$$

$$Q_T = v_{\Pi} F \gamma;$$

$$H_w = P(60Q_T)^{-1},$$

где  $T_{y.p}$  — время работы комбайна в установившемся режиме при отбойке одного вагона руды, мин;  $L$  — перемещение комбайна при отбойке одного вагона руды, м;  $Q_T$  — техническая производительность комбайна при отбойке одного вагона руды, т/мин;  $F$  — площадь забоя, обрабатываемая исполнительным органом, м<sup>2</sup>;  $\gamma$  — плотность руды в массиве, т/м<sup>3</sup>;  $P$  — среднее значение активной мощности, потребляемой двигателями в установившемся режиме работы, при отбойке одного вагона руды, кВт;  $H_w$  — удельные энергозатраты процесса разрушения калийного массива резцами комбайна, кВт · ч/т.

Удельное энергопотребление комбайна при отбойке руды существенно зависит от скорости подачи добычной машины на забой и физико-механических свойств калийного массива. Специалистами "ВНИИ Галургии" установлено, что снижение удельных энергозатрат при разрушении является достоверным признаком высокой выбороопасности соляных пород [6]. Таким образом, контроль активной мощности, потребляемой двигателями комбайна, и перемещения добычной машины позволяет осуществлять непрерывный автоматизированный прогноз газодинамических явлений в калийном массиве, что повышает интенсивность и безопасность ведения очистных работ. На основе актуальной информации о величине и характере нагруженности приводов возможно функционирование эффективных систем автоматического управления комбайнов.

Наличие продолжительных периодов работы двигателей комбайна в режиме холостого хода объясняется низкой производительностью средств доставки руды в очистных камерах — шахтных самоходных вагонов. Общее время работы приводов в режиме холостого хода определяется по ваттметрограмме и характеризует длительность вспо-

Таблица 2

Нагруженность приводных двигателей комбайна "Урал-20Р"

Обследуемые двигатели	Потребляемая мощность, кВт		Номинальная мощность привода, кВт
	$v_{\Pi} = 7,35$ м/ч	$v_{\Pi} = 12,0$ м/ч	
Резцовые диски 1	106,3	167,3	160
Резцовые диски 2	114,6	189,5	160
Бермовая фреза	101,6	165,0	2 × 75
Отбойное устройство	27,4	40,9	45
Переносное вращение	29,8	43,1	75

могательных операций при реализации основных технологических процессов отбойки и транспортирования руды.

Отключение двигателей комбайна от сети осуществляется при выполнении технического обслуживания, ремонта оборудования, маркшейдерских работ и т. п. Данные простои обусловлены технологическими причинами.

Время нахождения комбайна в плановых или аварийных ремонтах, а также стоимость выполненных ремонтных работ фиксируется в базах данных сервисных служб предприятия. Таким образом, календарное время эксплуатации добычной машины может быть достоверно определено и рассчитано по формуле

$$T_{\text{э.к}} = \Sigma T_{\text{у.р}} + \Sigma T_{\text{в.о}} + \Sigma T_{\text{п.т}} + \Sigma T_{\text{р.п}} + \Sigma T_{\text{р.а}}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{э.к}}$  — календарное время эксплуатации комбайна на руднике, ч;  $\Sigma T_{\text{у.р}}$  — суммарное время работы комбайна в установленном режиме, ч;  $\Sigma T_{\text{в.о}}$  — суммарное время реализации вспомогательных операций и переходных процессов при работе комбайна, ч;  $\Sigma T_{\text{п.т}}$  — длительность технологических простоев, ч;  $\Sigma T_{\text{р.п}}$  — длительность плановых ремонтов, ч;  $\Sigma T_{\text{р.а}}$  — длительность ремонтных работ, вызванных аварийными отказами оборудования, ч.

Исходя из формулы (1) критерии интегральной оценки эффективности использования оборудования механизированных комплексов, работы инженерно-технических и сервисных служб рудника могут быть определены следующими коэффициентами

$$k_{\text{м.в}} = \Sigma T_{\text{у.р}} / (\Sigma T_{\text{у.р}} + \Sigma T_{\text{в.о}} + \Sigma T_{\text{п.т}})^{-1};$$

$$k_{\text{п.т}} = 1 - (\Sigma T_{\text{в.о}} + \Sigma T_{\text{п.т}}) / (\Sigma T_{\text{у.р}} + \Sigma T_{\text{в.о}} + \Sigma T_{\text{п.т}})^{-1};$$

$$k_{\text{э.г}} = 1 - (\Sigma T_{\text{р.п}} + \Sigma T_{\text{р.а}}) / T_{\text{э.к}}^{-1};$$

$$k_{\text{а.п}} = \Sigma T_{\text{р.а}} / \Sigma T_{\text{р.п}},$$

где  $k_{\text{м.в}}$  — коэффициент машинного времени, характеризующий эффективность использования комбайна,  $k_{\text{м.в}} = 0 \dots 1$ ;  $k_{\text{п.т}}$  — коэффициент технологической подготовки, характеризующий уровень реализации процессов добычи и транспортирования руды в очистной камере,  $k_{\text{п.т}} = 0 \dots 1$ ;  $k_{\text{э.г}}$  — коэффициент эксплуатационной готовности, характеризующий надежность используемого оборудования и уровень работы сервисных служб предприятия,  $k_{\text{э.г}} = 0 \dots 1$ ;  $k_{\text{а.п}}$  — коэффициент аварийных простоев, характеризующий интенсивность потока внезапных отказов оборудования.

Оценка обоснованности проведения ремонтно-восстановительных работ возможна посредством определения стоимости машино-часа эксплуатационной готовности комбайна [9]

$$q_{\text{э.г}} = \frac{Q_{\text{з.р}}}{\Sigma T_{\text{у.р}} + \Sigma T_{\text{в.о}}},$$

где  $q_{\text{э.г}}$  — стоимость одного машино-часа готовности комбайна, тыс. руб./ч;  $Q_{\text{з.р}}$  — материальные затраты, связанные с поддержанием исправного состояния добычной машины (зарплата ремонтных рабочих, закупка запасных частей и т. д.) в расчетный период, тыс. руб.

Существенное увеличение стоимости машино-часа готовности отдельного комбайна по сравнению с остальными используемыми добычными машинами обуславливает необходимость постановки машины на капитальный ремонт или списания в утиль.

Спектральный анализ сигналов токов, потребляемых двигателями комбайна, осуществляется посредством реализации в программной среде MathCAD алгоритма быстрого преобразования Фурье (рис. 4). Частотное представление сигналов тока позволяет выявить в спектре составляющие от 0 до 1000 Гц, характеризующие колебания кинематической цепи "исполнительный орган — редуктор — приводной двигатель". Дефекты рабочих узлов и механических передач обуславливают возникновение переменных нагрузок, что вызывает появление новых частотных составляющих, не свойственных процессу функционирования исправной машины. Периодическое измерение частот в спектре тока, характеризующих конкретные дефекты в приводном электродвигателе и механической трансмиссии, позволит наиболее просто оценивать техническое состояние привода добыч-

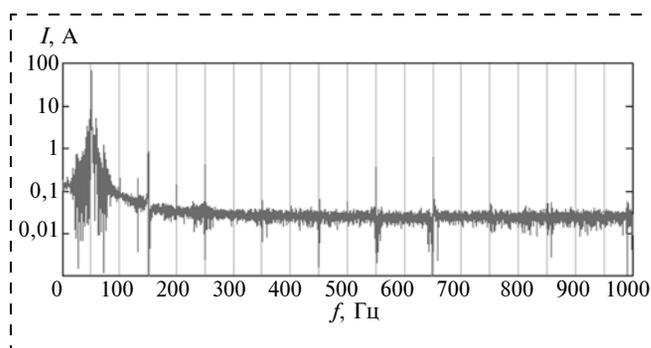


Рис. 4. Спектр тока асинхронного электродвигателя привода относительного движения резовых дисков комбайна "Урал-20Р" (логарифмический масштаб оси амплитуд)

ной машины и при необходимости осуществлять ремонтные действия, направленные на предупреждение аварийных отказов.

Посредством анализа записей потребляемых токов в асинхронных электродвигателях могут быть обнаружены дефекты электрической части ротора, включая обрывы обмотки ротора и замыкания пластин активного сердечника; электрической части статора, включая обрывы и электрическую несимметрию силовой обмотки, замыкания пластин активного сердечника; статический и вращающийся эксцентриситеты; дефекты подшипников, приводящие к флуктуациям формы воздушного зазора. Кроме того, важным диагностическим признаком являются величина и длительность протекания пусковых токов. В трансмиссиях исполнительных органов по характеру изменения токового сигнала могут быть диагностированы неисправности зубчатых зацеплений, посадки шестерен на вал, перекосы ведомых валов и их опор вращения, несоосность выстраиваемых в одну линию ведомых валов.

К недостаткам способа оценки технического состояния трансмиссий по потребляемому току относится трудность выявления ряда дефектов в начальной стадии развития. В первую очередь, это дефекты подшипников качения, выявление которых осуществляется опосредованно, например по изменениям характеристик зубчатого зацепления [10]. В целом же применение способа диагностирования технического состояния на основе анализа потребляемых токов перспективно, но требует проведения дополнительных исследовательских работ и создания адаптированных методик.

### Выводы

Использование бортовых измерительных систем, непрерывно регистрирующих мощности, потребляемые электродвигателями, перемещение и скорость подачи добычной машины в очистной выработке, позволяет наиболее просто и достоверно осуществлять контроль эксплуатационной нагруженности приводов комбайна, обуславливает возможность оперативного выявления негативных факторов и тенденций, влияющих на интенсивность реализации основных технологических процессов отбойки и транспортирования калийной руды. На основе актуальной информации о величине и характере нагруженности приводов воз-

можно функционирование эффективных систем автоматического управления комбайна и непрерывная реализация контроля выбросоопасности разрабатываемых пластов. Использование методов математической статистики и спектрального анализа при обработке полученных ваттметрограмм позволит выявить диагностические признаки и создать адаптированные методики оценки технического состояния узлов привода добычных машин, что положительно отразится на показателях надежности и эффективности использования проходческо-очистных комбайнов калийных рудников.

### Список литературы

1. **Загвоздкин И. В., Лесов Г. П., Янович Д. М.** Обеспечение безопасности и безаварийной работы комбайновых комплексов на рудниках ОАО "Уралкалий" // Безопасность труда в промышленности. 2013. № 9. С. 46—49.
2. **Чекмасов Н. В., Трифанов М. Г., Шишлянников Д. И., Иванов С. Л.** Методы оценки технического состояния и остаточного ресурса механических трансмиссий проходческо-очистного комбайна "Урал" // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 4. С. 272—278.
3. **Коломийцев М. Д.** Эксплуатация горных машин и автоматизированных комплексов. Л.: Изд-во ЛПИ, 1988. 96 с.
4. **Красников Ю. Д., Солод С. В., Хазанов Х. И.** Повышение надежности горных выемочных машин. М.: Недра, 1989. 215 с.
5. **Иванов С. Л.** Повышение ресурса трансмиссий горных машин на основе оценки энергонагруженности их элементов. СПб.: Санкт-Петербургский горный ин-т, 1999. 92 с.
6. **Лаптев Б. В.** Предотвращение газодинамических явлений на калийных рудниках. М.: Недра, 1994. 138 с.
7. **Трифанов Г. Д., Князев А. А., Чекмасов Н. В., Шишлянников Д. И.** Исследование нагруженности и возможности прогнозирования энергоресурса приводов исполнительных органов комбайна "Урал-20Р" // Горное оборудование и электромеханика. 2013. № 2. С. 41—44.
8. **Чекмасов Н. В., Шишлянников Д. И., Трифанов М. Г.** Оценка эффективности процесса разрушения калийного массива резцами исполнительных органов комбайна "Урал-20Р" // Известия вузов. Горный журнал. 2013. № 6. С. 103—107.
9. **Андреева Л. И.** Методология формирования технического сервиса горно-транспортного оборудования на угледобывающем предприятии: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 2004. 25 с.
10. **Барков А. В., Баркова Н. А., Борисов А. А.** Методика диагностирования механизмов с электроприводом по потребляемому току. СПб.: Севзапучцентр, 2012. 68 с.

**D. I. Shishlyannikov**, Associate Professor, e-mail: 4varjag@mail.ru, **N. V. Chekmasov**, Associate Professor, **M. G. Trifanov**, Junior Researcher, Perm National Research Polytechnic University, **V. V. Gabov**, Professor, **S. L. Ivanov**, Professor, **S. A. Asonov**, Postgraduate Student, National Mineral Resources University (University of Mines), Saint Petersburg, Russia

## Improving the Efficiency of Combines Potash Mines in the Analysis of Records

*We propose a method for controlling parameters and proved the concept of on-board software system mining machines "Ural". The results of experimental studies of loads drives executive bodies combines "Ural-20R". The technique of analysis of records, providing more efficient operation of the equipment mechanized mining complexes by quantifying the quantities characterizing the technical and technological level of the organization of the process of extraction of potash ore. Criteria of evaluation of the effectiveness of engineering and support services of the mining enterprise. Describes a continuous automated control outburst potash array.*

**Keywords:** mining combine, logger parameters, loading of drives, efficiency of use, service, assessment of technical condition, improving safety

### References

1. **Zagvozdkin I. V., Lesov G. P., Janovich D. M.** Obespechenie bezopasnosti i bezavariyjnoj raboty kombajnovykh kompleksov na rudnikah OAO "Uralkalij". *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2013. N. 9. P. 46—49.

2. **Chekmasov N. V., Trifanov M. G., Shishljannikov D. I., Ivanov S. L.** Metody ocenki tehničeskogo sostojanija i ostatochnogo resursa mehanicheskikh transmissij prohodčesko-ochistnogo kombajna "Ural". *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehničeskij zhurnal)*. 2014. N. 4. P. 272—278.

3. **Kolomijcev M. D.** *Jekspluatacija gornyh mashin i avtomatizirovannyh kompleksov*. L.: Izd-vo LGI, 1988. 96 p.

4. **Krasnikov Ju. D., Solod S. V., Hazanov H. I.** *Povyshenie nadjozhnosti gornyh vyemochnyh mashin*. M.: Nedra, 1989. 215 p.

5. **Ivanov S. L.** *Povyshenie resursa transmissij gornyh mashin na osnove ocenki jenergonagruzhennosti ih jelementov*. SPb.: Sankt-Peterburgskij gornyj in-t, 1999. 92 p.

6. **Laptev B. V.** *Predotvrashhenie gazodinamicheskikh javlenij na kalijnyh rudnikah*. M.: Nedra, 1994. 138 p.

7. **Trifanov G. D., Knjazev A. A., Chekmasov N. V., Shishljannikov D. I.** Issledovanie nagruzhennosti i vozmozhnosti prognozirovanija jenergoresursa privodov ispolnitel'nyh organov kombajna "Ural-20R". *Gornoe oborudovanie i jelektromehanika*. 2013. N. 2. P. 41—44.

8. **Chekmasov N. V., Shishljannikov D. I., Trifanov M. G.** Ocenka jeffektivnosti processa razrushenija kalijnogo mas-siva rezcami ispolnitel'nyh organov kombajna "Ural-20R". *Izvestija vuzov. Gornyj zhurnal*. 2013. N. 6. P. 103—107.

9. **Andreeva L. I.** Metodologija formirovanija tehničeskogo servisa gorno-transportnogo oborudovanija na ugledobyvajushhem predpriyatii: avtoref. dis. ... d-ra tehn. nauk. Ekaterinburg, 2004. 25 p.

10. **Barkov A. V., Barkova N. A., Borisov A. A.** *Metodika diagnostirovanija mehanizmov s jelektroprivodom po potrebljaemomu toku*. SPb.: Sevzapuchcentr, 2012. 68 p.

УДК 622.23.054.2:622.271.64

**А. Е. Пушкарев**, д-р техн. наук, проф., **В. В. Король**, канд. техн. наук, асс., **В. Г. Хачатурян**, асп., ТулГУ, г. Тула

E-mail: wil71@mail.ru

## Анализ технической возможности реализации струговой выемки

*Предложены схемы компоновки струговых установок, оснащенных гидромеханическими резцами, выполненными по схеме "струя через резец". Приведен пример подбора насосного оборудования.*

**Ключевые слова:** схема компоновки, струг, гидромеханическое разрушение

На сегодняшний день гидромеханический способ разрушения угля и горных пород хорошо себя зарекомендовал. Анализ результатов исследований, выполненных А. И. Бероном, А. Б. Голлодом, М. Г. Карабачевым, А. А. Карленковым, М. А. Лемешко, Б. А. Ошеровым, Е. З. Позиным, Н. И. Сысоевым, Б. Б. Луганцевым и другими учеными, позволяет сделать вывод о том, что одно из наиболее перспективных направлений развития добычной техники связано с совершенствованием оборудования струговой выемки. Однако применение стругов осложняется и даже становится невозможным при наличии в угольном пласте крепких породных включений. В связи с этим для расширения области применения струговых установок целесообразно использование в них гидромеханического способа разрушения, обеспечивающего разработку крепких углей и пород повышенной прочности.

Вопросы гидромеханического разрушения горного массива наиболее полно изучены и представлены в работах В. Е. Бафталовского, В. А. Бреннера, Л. Б. Глатмана, Ю. А. Гольдина, И. И. Дорошенко, К. В. Демина, А. Б. Жабина, И. В. Иванушкина, В. В. Король, И. А. Кузьмича, И. М. Лавита, В. Г. Мерзлякова, М. М. Миллера, Г. П. Никонова, А. Е. Пушкарева, В. В. Сафронова, С. Е. Харламова, М. М. Щеголевского и др. [1, 2]. Анализ возможных схем гидромеханического разрушения позволил установить наиболее предпочтительную схему, при которой вода высокого давления подается через канал, выполненный в теле резца, непосредственно в зону контакта инструмента с разрушаемым массивом. В настоящее время эта схема известна как схема "струя через резец". Для этих резцов, применительно к струговым установкам, выполнены исследования и установлены закономерности процесса резания угольного массива, которые позволяют рассчитать нагрузки, действующие на инструмент, и обосновать его рациональные конструктивные и режимные параметры [3].

Вместе с тем широкое распространение такого метода разработки ограничивается рядом проблем, одна из которых — создание воды высокого давления и ее подача к исполнительному органу струга. В настоящий момент обсуждаются несколько путей решения данной проблемы: применение насосных станций и использование станций на базе мультипликаторов. При этом для указанных выше вариантов существуют несколько схем компоновки машин:

1) насосное оборудование размещено в выработке и доставка воды к исполнительному органу

струга осуществляется при помощи рукавов высокого давления (РВД);

2) насосное оборудование установлено на струге и рабочая жидкость подается из бака либо по рукавам низкого давления (РНД).

Мультипликаторные станции, в свою очередь, состоят из двух блоков: блока низкого давления и блока преобразователя давления. В этом случае могут быть предложены три варианта компоновки машин:

блоки в едином агрегате размещены в штреке;

блоки в едином агрегате располагаются на рабочем органе струга;

блоки разнесены (мультипликатор установлен на струге, блок низкого давления — в штреке).

Проанализировав предложенные варианты компоновки машин, можно сделать вывод, что наиболее предпочтителен вариант с применением насосного оборудования, поскольку данный тип гидравлических машин более совершенен по сравнению с мультипликатором, легче, менее габаритный, проще в обслуживании. К тому же, привязка одной машины более рациональна с точки зрения компоновки, чем привязка нескольких элементов.

Таким образом, струговая установка, оснащенная гидромеханическим исполнительным органом, может иметь два варианта компоновки: с источником высокого давления, расположенным в штреке (рис. 1, а), и с насосом высокого давления на струге (см. рис. 1, б).

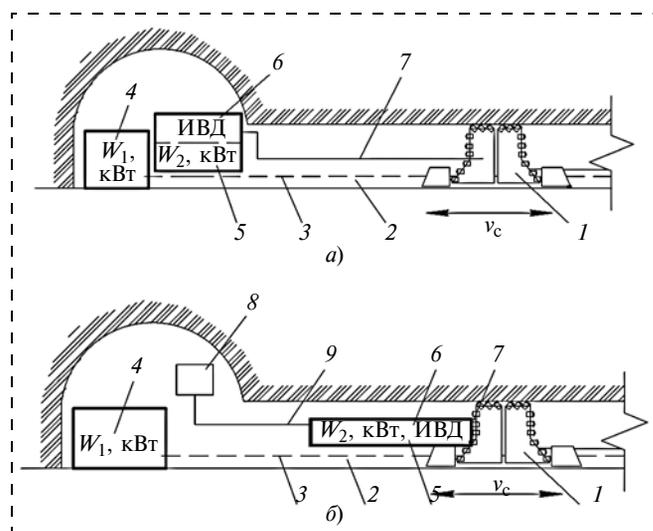


Рис. 1. Компоновочные схемы гидромеханической струговой установки с источником высокого давления, расположенным в штреке (а), и с насосом высокого давления на струге (б):

1 — струг; 2 — конвейер; 3 — тяговая цепь; 4 — тяговая станция; 5 — источник гидравлической мощности; 6 — насос высокого давления; 7 — рукав высокого давления; 8 — бак с водой; 9 — рукав низкого давления;  $W_1$  — мощность тяговой станции;  $W_2$  — гидравлическая мощность;  $v_c$  — скорость перемещения струга

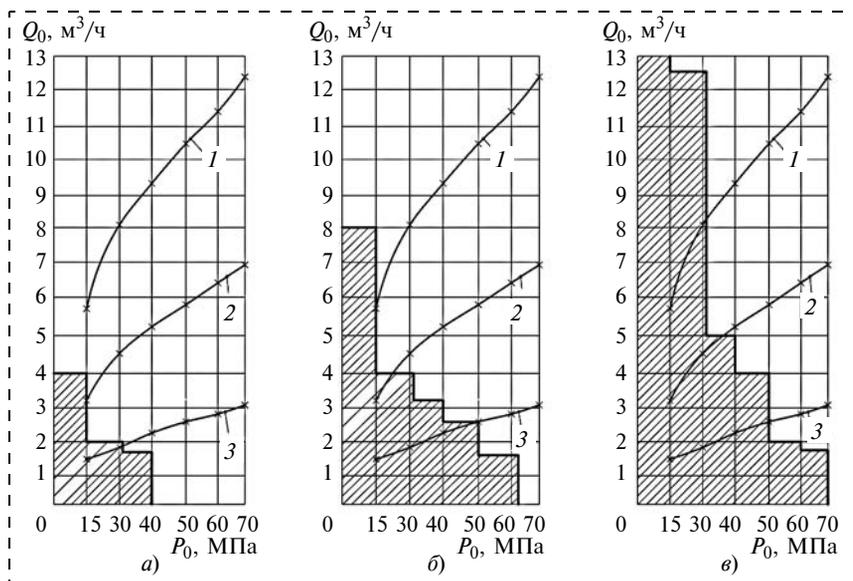


Рис. 2. Рабочие поля насосов:

а — типоразмера 1.1; б — типоразмера 2.3; в — типоразмера 1.3; 1 —  $d = 0,8$  мм; 2 —  $d = 0,6$  мм; 3 —  $d = 0,4$  мм;  $Q_0$  — производительность насоса;  $P_0$  — давление нагнетания рабочей жидкости;  $d$  — диаметр насадки реза

Основные технические характеристики типоразмеров трехплунжерных кривошипных горизонтальных насосов (ТУ 3632-002-59188358—2003)

Типоразмер	Давление на выходе, МПа	Подача, м <sup>3</sup> /ч	Максимальная мощность, кВт
1.1	8...40	0,25...8	4...25
2.3	8...63	0,8...16	25...50
1.3	12,5...100	1...30	40...160

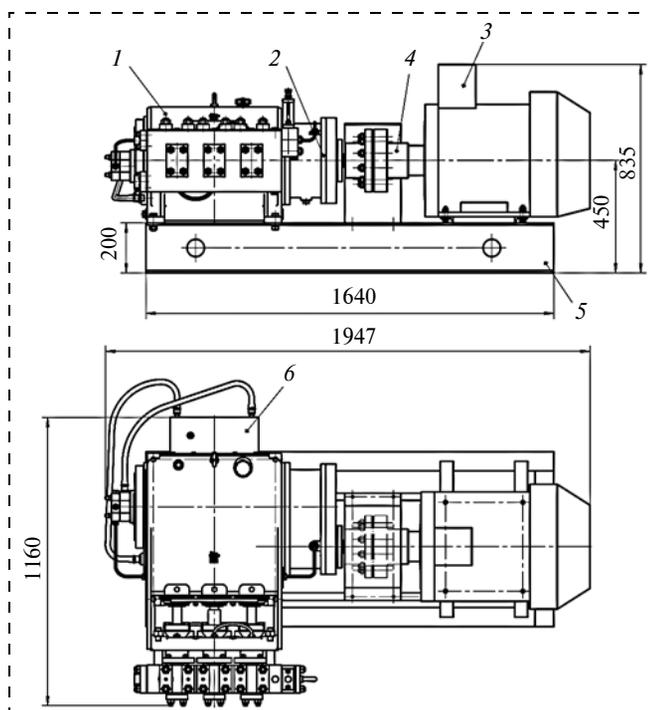


Рис. 3. Общий вид электронасосного агрегата типоразмера 1.3: 1 — трехплунжерный насос; 2 — встроенный редуктор; 3 — электродвигатель рудничного исполнения; 4 — муфта; 5 — рама; 6 — охладитель масла

Для примера реализации предложенных вариантов компоновочных схем предлагается использовать насосное оборудование отечественного производителя — ЗАО "Талнах" (г. Тула). Используя перечень и характеристики выпускаемого насосного оборудования, составляются рабочие поля на графиках зависимости расхода воды от давления для каждого типоразмера. Насосы ЗАО "Талнах" специально предназначены для непропорциональных режимов работы (малый расход при большом давлении).

Так, например, рабочие поля типоразмеров насосов серии 1.1; 2.3 и 1.3 (номенклатура завода-изготовителя) представлены на рис. 2, а основные технические характеристики — в таблице.

Сравнение графиков рабочих полей насосного оборудования типоразмеров 1.1; 2.3; 1.3 показывает, что насос типоразмера 1.3 (масса насоса 650 кг) имеет наибольшее рабочее поле и более полно удовлетворяет условиям по обеспечению производительности и выходного давления системы гидромеханического струга.

Для обоснования рациональных параметров насосного оборудования можно использовать Методику определения нагрузок на резах и резцовой головке стругового исполнительного органа, оснащенного гидромеханическими резами, выполненными по схеме "струя через резец", которая позволяет рассчитать силовые показатели струговых установок, оснащенных гидромеханическими резами, выполненными по схеме "струя через резец", и определить эффективность применения гидромеханических резов на серийно выпускаемых стругах [3].

При составлении рабочих полей для насосов серии 1.1; 2.3 и 1.3 приняты значения насадок реза 0,4; 0,6 и 0,8 мм и выходного давления рабочей жидкости 30; 40; 50; 60 и 70 МПа, так как указанные выше параметры использованы в исследованиях В. В. Король.

Так, например, при давлении 50 МПа и диаметре насадки 0,4 мм производительность составит 2,5 м<sup>3</sup>/ч при частоте вращения коленчатого вала 250 мин<sup>-1</sup> и диаметре плунжера 32 мм (подобрано на основе графика типоразмера 1.3). Гидравлическая мощность составит 49,6 кВт, что со-

ответствует техническим возможностям насоса типоразмера 1.3.

При этом габаритные размеры выбранного электронасосного агрегата (соединение насоса и электродвигателя через муфту, горизонтальная компоновка) представлены на рис. 3.

Определяя схему компоновки насосного оборудования в комплекте струговой установки и принимая во внимание достаточно большие габаритные размеры насосного агрегата, целесообразно реализовать схему с насосным агрегатом, вынесенным в штрек (см. рис. 1). Данное решение снизит массу струговой установки, уменьшит энергоемкость процесса перемещения струга вдоль забоя и сохранит рабочее пространство.

#### Список литературы

1. **Бреннер В. А., Жабин А. Б., Пушкарев А. Е., Щеголевский М. М.** Гидроструйные технологии в промышленности. Гидромеханическое разрушение горных пород. М.: Изд-во АГН, 2000. 343 с.
2. **Мерзляков В. Г., Бафталовский В. Е.** Физико-технические основы гидроструйных технологий в горном производстве. М.: Национальный научный центр горного производства ИГД им. А. А. Скочинского, 2004. 645 с.
3. **Король В. В., Пушкарев А. Е.** Определение рациональных параметров разрушения массива гидромеханическими резцами струговых установок // Известия ТулГУ. Науки о Земле. Вып. 1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. С. 305—307.
4. **Пушкарев А. Е., Король В. В.** Оценка эффективности оснащения струговой установки гидромеханическими резцами // Горное оборудование и электромеханика. 2012. № 3. С. 9—14.

**A. E. Pushkarev**, Professor, **V. V. Korol'**, Assistant, **V. G. Khachatryan**, Postgraduate Student, e-mail: wil71@mail.ru, Tula State University, Tula, Russia

## Analysis of the Technical Feasibility of the Plow Recess

*To date, hydromechanical method for breaking coal and rock well-proven. However, the use of plows complicated and even impossible in the presence of coal seam hard rock inclusions. In this connection, to extend the scope of plows expedient to use in the process them hydromechanical fracture development providing hard coal and rock strength. Possible schemes hydromechanical fracture allowed to establish the most preferred scheme in which high pressure water is fed through a channel formed in the cutter body, directly to the zone of contact with the tool array degradable. Currently, this scheme is known as a scheme "to flow through the tool". After analyzing the options proposed layout of machinery, it can be concluded that the preferred option using pumping equipment. A scheme of arrangement of pumping equipment complete plow, and taking into account the rather large dimensions of the pump unit, it is advisable to implement a scheme to pump unit made in drift. This solution will reduce the weight of the plow, will reduce the energy consumption of the process of moving the plow along the face and keep your workspace.*

**Keywords:** compose scheme, plough, hydra-mechanical destruction of coal and rocks, triplex plunger crank horizontal pump

#### References

1. **Brenner V. A., Zhabin A. B., Pushkarev A. E., Shhegolevskij M. M.** *Gidrostrujnye tehnologii v promyshlennosti. Gidromehanicheskoe razrushenie gornyh porod.* М.: Изд-во АГН, 2000. 343 p.
2. **Merzljakov V. G., Baftalovskij V. E.** *Fiziko-tehnicheskie osnovy gidrostrujnyh tehnologij v gornom proizvodstve.* М.: Nacional'nyj nauchnyj centr gornogo proizvodstva IGD im. A. A. Skochinskogo, 2004. 645 p.

3. **Korol' V. V., Pushkarev A. E.** Opredelenie racional'nyh parametrov razrushenija massiva gidromehanicheskimi rezcami strugovyh ustanovok. *Izvestija TulGU. Nauki o Zemle.* Vyp. 1. Tula: Izd-vo TulGU, 2011. P. 305—307.
4. **Pushkarev A. E., Korol' V. V.** Ocenka jeffektivnosti osnashhenija strugovoj ustanovki gidromehanicheskimi rezcami. *Gornoe oborudovanie i jelektromehanika.* 2012. N. 3. P. 9—14.

УДК 622.24.05

**В. Г. Бугаев**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, директор, **С. П. Ереско**<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф., **И. В. Бугаев**<sup>1</sup>, инж.

<sup>1</sup>ООО "Тулсиб", г. Красноярск;

<sup>2</sup>СибГАУ им. акад. М. Ф. Решетнева, г. Красноярск

E-mail: eresko07@mail.ru

## **Анализ эффективности проходки скважин в мерзлых грунтах бурильно-крановыми машинами, оснащенными инструментом с различными режущими элементами**

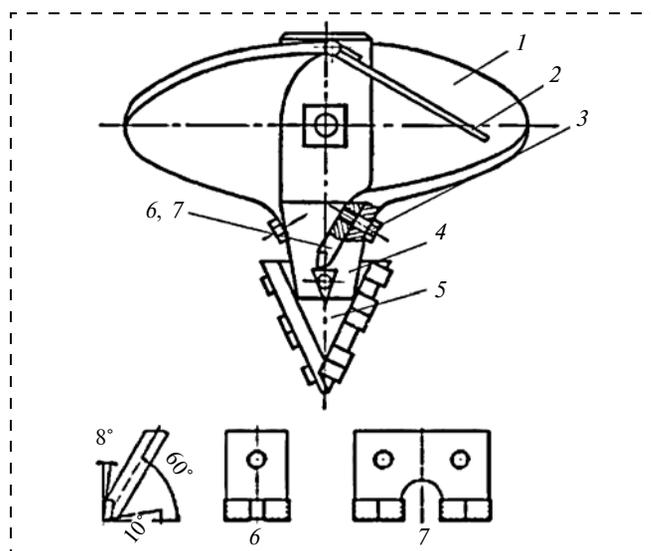
*Приведено описание конструкций серийных лопастных и спиральных буров и различных режущих элементов для их оснащения. Кратко описаны конструкции плоских и спиральных буровых головок к шнекам, для оснащения которых используются различные конструкции резцов из угольной и горнорудной промышленности. Сформулирована цель экспериментальных исследований буров с различными режущими элементами в мерзлых грунтах и дано краткое описание конструкций этих буров. Изложены результаты экспериментальных исследований, дан их анализ по скорости бурения мерзлых грунтов. По результатам этих исследований выбрана оптимальная ширина режущей кромки резца и созданы рациональные конструкции унифицированных режущих элементов для оснащения лопастных, спиральных и короткошнековых буров легкой серии.*

**Ключевые слова:** буровой режущий инструмент, лопастные, спиральные, плоские и короткошнековые буровые головки, режущие элементы (забурники, перки, резцы), ширина режущей кромки, экспериментальные исследования, хронометражные наблюдения, чистое и общее время бурения скважины, механическая скорость бурения и техническая производительность бурильно-крановой машины БМ-205Б

Бурильно-крановые машины БМ-205Б, БМ-205Д, БМ-302Б и БКМ-317 Алапаевского ОАО "Стройдормаш", БКМА-1,0/3,5 Ростовского ООО "Механический завод" и буровые машины МРК-690А4 и МРК-750Т ОАО "ИвЭнергомаш" нашли широкое применение в народном хозяйстве страны. Они предназначены для бурения скважин и установки в них опор при строительстве, ремонте и обслуживании радиотрансляционных, телефонно-телеграфных линий связи и низковольтных линий электропередачи; для бурения скважин под свайные фундаменты, столбы ограждений в промышленном, гражданском, транспортном строительстве и горном производстве. Кроме того, предусмотрена широкая область их применения и при строительстве других объектов: для бурения скважин и котлованов под фундаменты подстанционного пускового оборудования, различных нефтегазотрубопроводов, при установке горизонтальных надземных резервуаров и прокладке различных технологических трубопроводов, при выполнении специальных работ по закреплению фундаментов различных зданий и сооружений и при подготовке ямок под посадку деревьев и кустарников. Однако мерзлотно-грунтовая область

эффективного их применения ограничена техническими возможностями поставляемого с ними серийного бурового режущего инструмента.

Данные машины оснащают лопастными (рис. 1) и спиральными (рис. 2) бурами и спиральными



**Рис. 1.** Серийный лопастной бур диаметром 500 мм Алапаевского ОАО "Стройдормаш":

1 — корпус; 2 — захлопка; 3 — болтовое крепление; 4 — наконечник; 5 — перка; 6 — однозубый буровой резец; 7 — двузубый буровой резец

буровыми головками (рис. 3) диаметром от 0,3 до 1,0 м, режущие элементы (перки и резцы) которых имеют разнообразное конструктивное исполнение. Перки в этих бурах выполнены в виде треугольников шириной 140...230 мм. Режущие кромки перок и резцов армированы стандартными твердосплавными пластинами марки ВК6 и ВК8 шириной от 18 до 24 мм плоской прямоугольной или полукруглой формы.

Для оснащения лопастных буров используют однозубые 6 и двузубые 7 (см. рис. 1) буровые резцы, закрепляемые к траверсам бура с помощью болтов. Резцы в этих бурах устанавливают под углом  $60^\circ$  к плоскости вращения в одну линию по диаметру в шахматном порядке с частичным разрывом линии резания и на одном уровне по высоте, благодаря чему образуется бесступенчатая форма забоя. Геометрия резцов, армированных твердосплавными пластинами, обеспечивает положительный передний угол, равный  $8^\circ$ , и задний угол, равный  $10^\circ$ .

Для оснащения спиральных буров используют специальные буровые резцы 6 (см. рис. 2) с поперечным боковым пазом в его корпусе, которые устанавливают в уступы, вырезанные по периферии двух винтовых транспортирующих лопастей, и закрепляют в них с помощью болтов. Для оснащения спиральных буровых головок используют быстросъемные буровые резцы с конусным хвостовиком 6 (см. рис. 3), которые устанавливают в специальные конусные втулки, закрепленные с помощью электросварки по периферии двух винтовых транспортирующих лопастей. Режущие кромки этих резцов располагаются на разных радиусах вращения с отставанием друг от друга в горизонтальной плоскости на угол  $15^\circ$ .

Благодаря такой схеме расстановки резцов на транспортирующих лопастях образуется ступенчатая форма забоя скважины. Продольные оси резцов имеют одинаковый угол наклона к оси буровой головки, кроме двух периферийных. Геометрия резцов, армированных твердосплавными пластинами, обеспечивает положительный передний угол, равный  $10^\circ$ , и задний угол, равный  $8^\circ$ .

Наряду с серийно выпускаемыми конструкциями буров строительные организации собственными силами изготавливают плоские (рис. 4, а) и спиральные однозаходные (см. рис. 4, б) буровые головки к шнекам для оснащения бурового оборудования типа СО-2. В качестве режущих элементов используют резцы РП-3, КБ-01, РК-8Б, И-90МБ и других конструкций из угольной и горнорудной промышленности, режущие кромки ко-

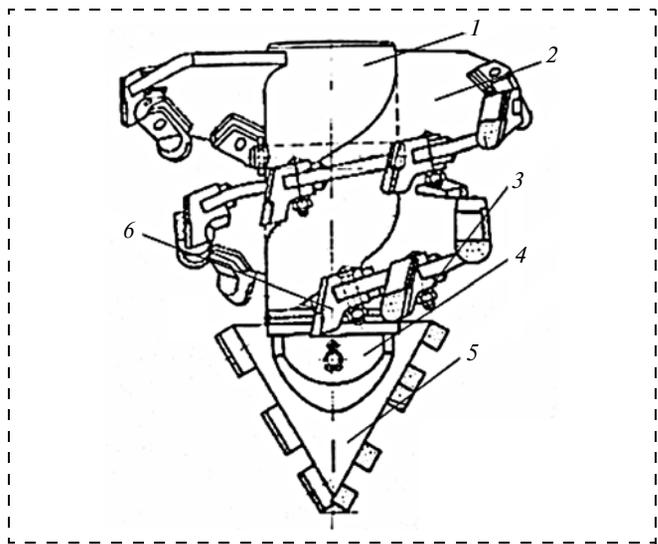


Рис. 2. Серийный спиральный бур БМГ диаметром 400 мм: 1 — корпус; 2 — спиральная лопасть; 3 — болтовое крепление; 4 — наконечник; 5 — перка; 6 — специальный буровой резец

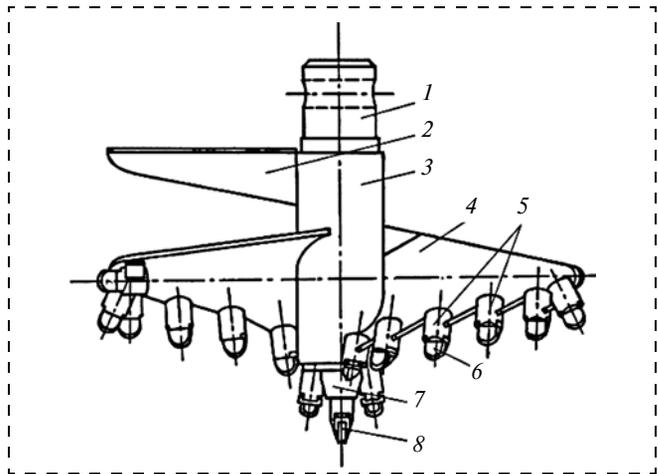


Рис. 3. Серийная спиральная буровая головка диаметром 750 мм ОАО "Ивэнгергомаш": 1 — хвостовик; 2 — виток; 3 — корпус; 4 — спиральная лопасть; 5 — конусные втулки; 6 — буровой резец с конусным хвостовиком; 7 — наконечник; 8 — забурник

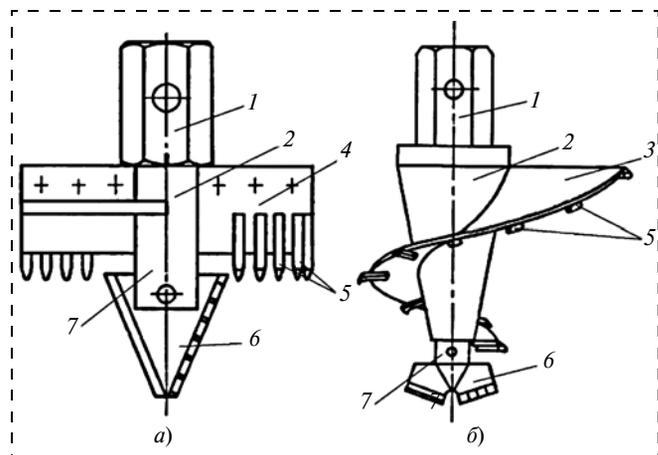


Рис. 4. Буровые головки к шнекам: 1 — хвостовик; 2 — корпус; 3 — спиральная лопасть; 4 — траверса; 5 — буровые резцы; 6 — перка или забурник; 7 — наконечник

торых армированы стандартными твердосплавными пластинами различной формы и ширины.

Резцы с помощью электросварки закрепляют на траверсах или периферийных кромках винтовых транспортирующих лопастей с различным интервалом и шагом их расстановки. Большинство из этих буровых головок имеют недостаточно совершенную конструкцию, а также низкое качество изготовления. Ремонт и восстановление этих буровых головок проводят непосредственно на строительных площадках или в ремонтных мастерских строительных организаций.

Как показала практика эксплуатации указанных выше бурильно-крановых, буровых машин и оборудования вращательного действия, что поставяемые с ними лопастные и спиральные буры, плоские и спиральные буровые головки обеспечивают эффективное бурение скважин лишь в талых и слабых сезонно-мерзлых грунтах прочностью до 100...150 ударов по плотномеру ДорНИИ и с ограниченным содержанием до 15 % по объему гравийно-галечниковых включений. С ростом прочности мерзлых и вечномерзлых грунтов до 300 ударов по плотномеру ДорНИИ и увеличением содержания твердых включений до 45 % по объему из-за низкой стойкости их режущих элементов к ударным нагрузкам происходит быстрое разрушение армирующих пластин твердого сплава, а затем и корпусов режущих элементов. В связи с этим практически становится невозможным применение перечисленных выше машин и оборудования в грунтах прочностью свыше IV категории по СНИП.

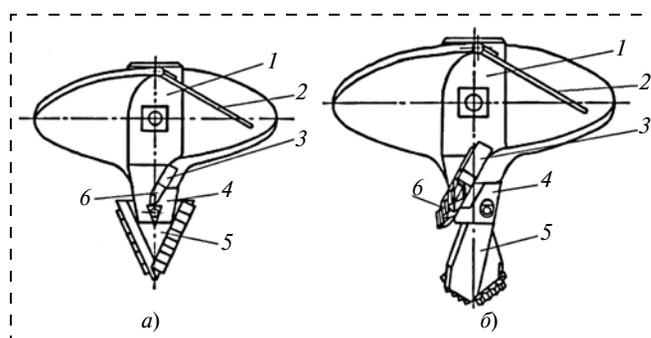
Проведенный анализ существующих конструкций бурового инструмента свидетельствует о большом их многообразии и обилии всевозможных конструкций режущих элементов, используемых для бурения скважин в мерзлых грунтах. Это связано, по нашему мнению, с отсутствием в стране специализированного производства бурового режущего инструмента строительного назначения. До настоящего времени не выработано также четких рекомендаций по выбору рациональной конструкции, геометрии и параметров грунторазрушающих режущих элементов.

Обычно при поиске рациональной конструкции режущих элементов в основном изменяют углы заточки, форму и размеры твердосплавной пластины для армирования режущей кромки и конструктивное исполнение хвостовика, обеспечивающего соединение с буровой головкой. Кроме того, обязательным условием при выборе рациональной конструкции буров является тенденция поиска

рационального расположения грунторазрушающих режущих элементов в пространстве забоя скважины для обеспечения наилучшего разрушения различных грунтов. Целенаправленный поиск рациональных конструкций должен быть основан на подробном поэлементном анализе режущих элементов как сложных и ответственных деталей бурового режущего инструмента, оказывающих наибольшее влияние на эффективность процесса бурения скважин [1, 2]. Для этого должна проводиться постоянная работа в целях систематизации данных как о конструкциях грунторазрушающих режущих элементов, так и о результатах их испытаний и эксплуатации. Все эти данные необходимы для целенаправленной разработки новых типов грунторазрушающих режущих элементов и для создания единой системы их наименований и обозначений.

В целях оценки эффективности бурения скважин в мерзлых грунтах и выбора оптимальной ширины режущей кромки и рациональной конструкции буровых резцов были проведены полигонные экспериментальные исследования лопастных буров с различными режущими элементами. В качестве критерия эффективности процесса бурения принята механическая скорость бурения [3, 4]. Для проведения исследований были изготовлены экспериментальные лопастные буры диаметром 360 и 500 мм (рис. 5, *а* и *б*), оснащенные тремя типами траншейных и буровых резцов (рис. 6, *а—в*) и поворотных резцов (см. рис. 6, *г*), перками ПБМ-120 и забурниками ЗБМ-140 диаметром соответственно 120 и 140 мм.

В экспериментальных лопастных бурах в качестве остова были использованы стальные литые корпуса, изготовленные методом черного литья. Резцедержатели, забурники и наконечники были



**Рис. 5. Экспериментальные лопастные буры:**  
*а* — диаметром 360 мм с резами РГМ-18 и перкой ПБМ-120; *б* — диаметром 500 мм с резами РБМ-35 и забурником ЗБМ-140; 1 — корпус; 2 — захлопка; 3 — резцедержатель; 4 — наконечник; 5 — перка или забурник; 6 — траншейные и буровые резцы

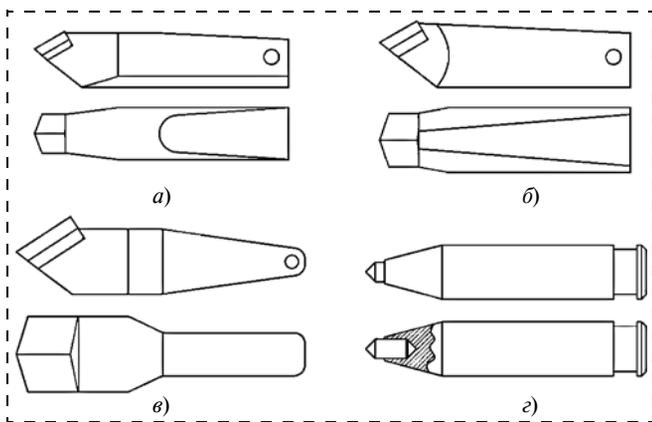


Рис. 6. Экспериментальные образцы резцов для проведения исследований: а — траншейные РТМ-18; б — траншейные РТМ-25; в — буровые РБМ-35; г — поворотные типа РКС-1

изготовлены методом точного литья по выплавляемым моделям. Отлитые резцедержатели и наконечники с помощью электросварки закреплялись к стальному корпусу после соответствующей их механической обработки путем фрезерования и расточки посадочных мест.

Перки выполнены в виде плоских треугольников, изготовленных из листовой стали толщиной 20 мм с помощью механической обработки путем фрезерования пазов под пластины твердого сплава и сверления отверстия под палец. Забурники в данных бурах выполнены по типу РХ — "рыбий хвост", позволяющие обеспечивать лучшее начальное забуривание и центрирование бура по оси скважины, а также существенно снижать усилие внедрения его в грунт. Корпуса траншейных РТМ-18, РТМ-25 и поворотных резцов изготовлены с помощью механической обработки из круга диаметром 30 мм стали марки 40Х. Корпуса буровых резцов РБМ-35 изготовлены с применением метода горячей штамповки из стали марки 35ХГСА.

Для разрушения мерзлых грунтов режущие кромки перок, забурников, буровых и траншейных резцов армированы пластинами твердого сплава марки ВК15. Для перок и забурников использованы пластины Т-18, а для траншейных и буровых резцов — пластины Т-18, Т-25 и Т-35 с клиновидной формой передней грани, серийно выпускаемые по ТУ-48-19-371—83. Пластины твердого сплава установлены на корпусах буровых и траншейных резцов в открытые пазы (см. рис. 6, а—в). Для армирования поворотных резцов использованы круглые штыри из твердого сплава марки ВК8 диаметром 6; 8 и 10 мм, установленные в закрытые пазы (см. рис. 6, г).

Буровые и траншейные резцы на этих бурах в пространстве забоя скважины расположены по спирально-ступенчатой схеме с шагом расстановки от 38 до 72 мм в зависимости от ширины режущей кромки резцов и углом конусности до  $150^\circ$ . В лопастных бурах с резцами РТМ-18, РТМ-25 и РБМ-35 предусмотрена сетка резания со сплошной схемой разрушения грунта на забое скважины с превышением резцов относительно друг друга и с дублированием их в крайних линиях резания. Лопастные буры с поворотными резцами обеспечивают сетку резания с оставлением концентрических целиков за счет установки резцов с последовательным превышением относительно друг друга и с дублированием их в крайних линиях резания. При этом число резцов различной конструкции на лопастных бурах диаметром 360 и 500 мм соответственно составило: с РТМ-18 — 8 и 12 шт.; с РТМ-25 — 6 и 10 шт.; с РБМ-35 — 4 и 6 шт. и с поворотными резцами — 10 и 16 шт.

Для закрепления буровых и траншейных резцов в резцедержателях применен простой и надежный способ с помощью шплинтов, обеспечивающий их удобную и быструю замену. Для закрепления поворотных резцов в резцедержателях использованы пружинные фиксаторы.

Опытное бурение скважин проводили непосредственно в массиве мерзлого грунта в условиях естественного залегания на двух площадках бурильно-крановой машиной БМ-205Б, обеспечивающей следующие режимные параметры: частота вращения бура 100 и 140  $\text{мин}^{-1}$ , осевое усилие подачи на бур до 2,9 кН и максимальный крутящий момент до 4,5 кН · м. Грунты на площадках исследований были представлены однородными суглинками с отдельными прослойками вязкой глины и супесями, содержащими в своем составе до 30 % по объему включений гравия и гальки размером от 10 до 30 мм. Прочность мерзлых грунтов с поверхности изменялась от 150 до 200 ударов по плотномеру ДорНИИ, а глубина промерзания грунтов достигала 2,3 м [5, 6].

В процессе экспериментальных исследований бурение скважин проводили с поверхности на глубину 1,2 м, где мерзлые грунты имели наибольшую прочность. При этом максимальная глубина бурения достигалась за два цикла по 0,6 м. Бурение скважин в супесях с твердыми включениями осуществляли при частоте вращения бура 100  $\text{мин}^{-1}$ , а в однородных суглинках — при 140  $\text{мин}^{-1}$ .

В качестве основного метода измерений исследуемых параметров принят метод выборочного

пооперационного хронометража времени в процессе бурения скважин. Выбранный метод при сравнительно небольших затратах позволяет достаточно точно установить механическую скорость бурения, свидетельствующую об эффективности процесса бурения. Точность измерений при выборочном хронометраже должна быть не ниже 0,5...1,0 с. Для реализации указанного метода были намечены определенные глубины бурения скважин, на которых с помощью секундомера фиксировалось время чистого бурения и время выполнения вспомогательных операций, т. е. общее время бурения скважины. В результате последующих расчетов оперативно определялись средняя механическая скорость бурения и техническая производительность бурильно-крановой машины БМ-205Б. Для получения достоверных результатов экспериментальных исследований опыты при хронометражных наблюдениях повторялись до 15—20 раз.

В период проведения полигонных экспериментальных исследований лопастных буров с различными режущими элементами было пробурено свыше 3 тыс. м скважин на двух площадках с грунтами, характеристика которых приведена выше. В результате полученных и обработанных данных хронометражных наблюдений расчетным способом были определены средняя механическая скорость и техническая производительность бурения скважин, численные значения которых приведены в таблице.

Проведенными полигонными экспериментальными исследованиями подтверждена работоспособность экспериментальных лопастных буров с различными режущими элементами и уточнены

Результаты полигонных исследований лопастных экспериментальных буров с различными режущими элементами

Диаметр бура, мм	Тип резца	Число резцов, шт.	Ширина режущей кромки, мм	Механическая скорость бурения, м/мин	Техническая производительность, м/ч
360	Поворотный	РТМ-18	10	0,81/0,68	29,2/24,5
		РТМ-25	8	1,28/1,08	46,1/38,9
		РБМ-35	6	1,54/1,25	55,4/45,0
		РБМ-35	4	2,59/2,12	93,2/76,3
500	Поворотный	РТМ-18	16	0,62/0,57	22,3/20,5
		РТМ-25	12	1,03/0,87	37,1/31,3
		РТМ-25	10	1,22/1,04	43,9/37,4
		РБМ-35	6	1,97/1,56	70,9/56,2

Примечание: в числителе приведены показатели бурения в однородном суглинке, в знаменателе — в супеси с твердыми включениями.

основные технические показатели бурения скважин в мерзлых грунтах — однородных и с гравийно-галечниковыми включениями до 30 % объема. При этом в зависимости от диаметра бура, ширины режущей кромки, структуры, состава и прочности мерзлых грунтов средняя механическая скорость бурения изменялась от 0,57 до 2,59 м/мин, а техническая производительность бурения колебалась в пределах 20,5...93,2 м/ч.

Такой широкий диапазон изменения полученных технических показателей бурения свидетельствует о значительном диапазоне потенциальных возможностей испытываемых лопастных буров, оснащенных резцами с различной шириной режущей кромки, и целесообразности выбора оптимального ее значения и рациональной конструкции бурового резца для последующего его промышленного освоения.

В процессе проведения полигонных экспериментальных исследований также было выявлено следующее:

при бурении скважин в мерзлых суглинках с прослойками вязкой глины происходило постоянное залипание поворотных резцов и перки разрушенным грунтом, вследствие чего значительно снижалась подача бура на забой скважины до полной ее остановки и прекращения процесса бурения, что свидетельствует о нецелесообразности применения подобного бурового инструмента в указанных грунтовых условиях; наблюдался равномерный незначительный износ режущих кромок на всех других резцах и забурниках;

при бурении скважин в мерзлых супесях с включениями мелкого гравия и гальки до 30 % объема происходило постоянное разрушение твердосплавных штырей диаметром 6 и 8 мм на поворотных резцах и частичное выкрашивание и разрушение режущих кромок твердосплавных пластин Т-18 и Т-25 на траншейных резцах, что свидетельствует о недостаточной их прочности и стойкости к ударным нагрузкам; видимых разрушений твердосплавных штырей диаметром 10 мм и твердосплавных пластин Т-35 соответственно на поворотных и буровых резцах не наблюдалось; отказов и поломок деталей корпусов буров, резцедержателей и корпусов режущих элементов не наблюдалось, что свидетельствует о их достаточной прочности и рационально выбранных параметрах.

Анализ данных таблицы показывает, что среди испытываемых буров одинакового диаметра наибольшие значения средней механической скорости

и технической производительности бурения получены бурами диаметром 360 и 500 мм с резцами РБМ-35, изменяющиеся от 1,56 до 2,59 м/мин и от 56,2 до 93,2 м/ч соответственно в зависимости от структуры, состава и прочности разбуриваемых мерзлых грунтов, что вполне удовлетворяет требованиям современных технологий электросетевого и свайного строительства. Данные таблицы также показывают, что технические показатели бурения скважин в различных мерзлых грунтах экспериментальными лопастными бурами диаметром 360 и 500 мм с резцами РБМ-35 превосходят аналогичные показатели бурения скважин лопастными бурами с другими режущими элементами:

с поворотными резцами с шириной их режущей кромки 10 мм в 3,21—2,74 раза;

с траншейными резцами РТМ-18 с шириной их режущей кромки 18 мм в 2,02—1,81 раза;

с траншейными резцами РТМ-25 с шириной их режущей кромки 25 мм в 1,71—1,51 раза.

Полученные данные полигонных экспериментальных исследований свидетельствуют о значительном преимуществе лопастных буров диаметром 360 и 500 мм, оснащенных резцами РБМ-35 с оптимальной шириной режущей кромки 35 мм перед лопастными бурами аналогичных диаметров с другими режущими элементами. В процессе проведения экспериментальных исследований максимальные скорости бурения скважин в различных мерзлых грунтах лопастными бурами диаметром 360 и 500 мм с резцами РБМ-35 достигали значений соответственно 3,3 и 2,4 м/мин, что свидетельствует о высокой эффективности процесса бурения скважин в мерзлых грунтах однородных и с гравийно-галечниковыми включениями и оптимально выбранной ширине режущей кромки резца РБМ-35 и рациональной его конструкции.

Кроме того, проведенными широкомасштабными эксплуатационными испытаниями буров в различных регионах страны [7—9] дополнительно подтверждены оптимальная ширина режущей кромки резца и рациональная конструкция созданных унифицированных резцов РБТ-35 и РБМ-35 и забурников ЗБТ-140 и ЗБМ-140 для оснащения лопастных, спиральных и короткошnekовых буров легкой серии. Конструктивные особенности их заключаются в армировании режущих кромок резцов и забурников различными наплавочными материалами и твердосплавными пластинами для бурения скважин в разнообразных мерзлотно-грунтовых условиях:

РБТ-35 и ЗБТ-140 с наплавкой для бурения различных талых грунтов;

РБМ-35 и ЗБМ-140 со стандартными пластинами твердого сплава форм 02215 и 02271 для бурения однородных мерзлых грунтов;

РБМ-35А и ЗБМ-140-18 (25) со специальными пластинами твердого сплава форм Т-35 и Т-18 (25), серийно выпускаемыми по ТУ 48-13-371—83 для бурения мерзлых грунтов с твердыми включениями до 45 % объема;

РБМ-35У и РБС-35 с усиленными экспериментальными пластинами твердого сплава специальных форм для бурения мерзлых грунтов с твердыми включениями до 60 % объема и со слабыми скальными трещиноватыми прослойками.

Предлагаемые унифицированные буровые резцы и забурники отличаются рациональными геометрическими параметрами и конструктивными особенностями, упрочняющими наплавками режущих кромок, клиновидной формой передней грани и рациональной ориентацией твердосплавных пластин относительно равнодействующей сил реакции разрушаемого грунта, что обеспечивает минимальные растягивающие напряжения в твердом сплаве и тем самым значительно повышает стойкость режущих элементов.

Полученные результаты полигонных экспериментальных исследований и широкомасштабных эксплуатационных испытаний буров легкой серии позволили определить оптимальную ширину режущей кромки и рациональную конструкцию резца РБМ-35, подтвердивших целесообразность создания и промышленного освоения комплекта буров легкой серии диаметром 0,3...1,0 м с различными режущими элементами повышенной стойкости для оснащения бурильно-крановых, буровых машин и оборудования вращательного действия в целях расширения грунтовой области их применения и повышения технико-экономических показателей буровых работ в строительном производстве [10].

#### Список литературы

1. Бугаев В. Г., Ереско С. П., Бугаев И. В. Выбор и обоснование конструктивных параметров бурового режущего инструмента для проходки скважин в мерзлых грунтах. Ч. 1 // Горное оборудование и электромеханика. 2013. № 1. С. 19—24.
2. Бугаев В. Г., Ереско С. П., Бугаев И. В. Выбор и обоснование конструктивных параметров бурового режущего инструмента для проходки скважин в мерзлых грунтах. Ч. 2 // Горное оборудование и электромеханика. 2013. № 2. С. 6—13.
3. Бугаев В. Г., Ереско С. П., Бугаев И. В. Выбор и обоснование критерия оптимизации режимов бурения

строительных скважин в мерзлых грунтах // Строительные и дорожные машины. 2013. № 4. С. 34—39.

4. **Бугаев В. Г., Ереско С. П., Бугаев И. В.** Влияние режимных параметров на показатели эффективности процесса бурения скважин в мерзлых грунтах // Горное оборудование и электромеханика. 2013. № 9. С. 16—21.

5. **Васильев С. И., Ереско С. П., Жубрин В. Г., Осипенко Б. В.** Разработка сезонно-мерзлых грунтов Восточной Сибири траншейными экскаваторами. Красноярск: ИПК СФУ, 2010. 140 с.

6. **Васильев С. И., Ереско С. П.** Исследование прочностных характеристик сезонно-мерзлых грунтов Сибири и Севера // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 5. С. 93—99.

7. **Бугаев В. Г.** Результаты эксплуатационных испытаний буров легкой серии // Межвуз. сб. науч. тр. с

междунар. участием / под ред. С. П. Ереско. Транспортные средства Сибири. Вып. 10. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. С. 409—424.

8. **Бугаев В. Г., Ереско С. П.** Исследование линейного износа буровых резцов, наплавленных износостойкими материалами // Межвуз. сб. науч. тр. с междунар. участием / под ред. С. П. Ереско. Транспортные средства Сибири. Вып. 8. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2002. С. 501—507.

9. **Васильев С. И., Ереско С. П., Жубрин В. Г., Осипенко Б. В.** Прогнозирование условий разработки сезонно-мерзлых грунтов Восточной Сибири // Наука и техника в дорожной отрасли. Вып. 4. 2010. С. 35—38.

10. **Бугаев В. Г., Ереско С. П.** Буровой режущий инструмент / под общ. ред. С. П. Ереско. Красноярск: Сиб. фед. ун-т, 2011. 276 с.

**V. G. Bugaev**<sup>1</sup>, Director, **S. P. Eresko**<sup>2</sup>, Professor, e-mail:eresko07@mail.ru, **I. V. Bugaev**<sup>1</sup>, Engineer

<sup>1</sup>Toolsib limited liability Company, Krasnoyarsk, Russia;

<sup>2</sup>Siberian State Space University of a Name of the Academician M. F. Reshetnev, Krasnoyarsk, Russia

## Analysis of Efficiency of the Driving of Wells in Frozen Soil by the Boring and Crane Cars Equipped with the Tool with Various Cutting Elements

*The description of designs of serial bladed and spiral drills and various cutting elements for their equipment is provided. Designs of flat and spiral boring heads to screws for which equipment various designs of cutters from coal and ore mining industry are used are briefly described. The purpose of pilot studies of drills with various cutting elements in frozen soil is formulated and the short description of designs of these drills is given. Results of pilot studies are stated, their analysis on the speed of drilling of frozen soil is given. By results of these researches the optimum width of the cutting edge of a cutter is chosen and rational designs of the unified cutting elements for equipment bladed, spiral and the short- screw of drills of an easy series are created.*

**Keywords:** the boring cutting tool, bladed, spiral, flat and short- screw boring heads, the cutting elements (drill tip, brace bits, cutters), width of the cutting edge, pilot studies, time supervision, pure and general time of drilling of a well, mechanical speed of drilling and technical productivity of the boring and crane BM-205B car

### References

1. **Bugaev V. G., Eresko S. P., Bugaev I. V.** Vybor i obosnovanie konstruktivnyh parametrov burovogo rezhushhego instrumenta dlja prohodki skvazhin v mjorzlyh gruntah. Ch. 1. *Gornoe oborudovanie i jelektromehaniika*. 2013. N. 1. P. 19—24.

2. **Bugaev V. G., Eresko S. P., Bugaev I. V.** Vybor i obosnovanie konstruktivnyh parametrov burovogo rezhushhego instrumenta dlja prohodki skvazhin v mjorzlyh gruntah. Ch. 2. *Gornoe oborudovanie i jelektromehaniika*. 2013. N. 2. P. 6—13.

3. **Bugaev V. G., Eresko S. P., Bugaev I. V.** Vybor i obosnovanie kriterija optimizacii rezhimov burenija stroitel'nyh skvazhin v mjorzlyh gruntah. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2013. N. 4. P. 34—39.

4. **Bugaev V. G., Eresko S. P., Bugaev I. V.** Vlijanie rezhimnyh parametrov na pokazateli jeffektivnosti processa burenija skvazhin v mjorzlyh gruntah. *Gornoe oborudovanie i jelektromehaniika*. 2013. N. 9. P. 16—21.

5. **Vasil'ev S. I., Eresko S. P., Zhubrin V. G., Osipenko B. V.** *Razrabotka sezonno-mjorzlyh gruntov Vostochnoj Sibiri tranšejnymi jekskavatorami*. Krasnojarsk: IPK SFU, 2010. 140 p.

6. **Vasil'ev S. I., Eresko S. P.** Issledovanie prochnostnyh harakteristik sezonno-mjorzlyh gruntov Sibiri i Severa. *Sistemy. Metody. Tehnologii*. 2010. N. 5. P. 93—99.

7. **Bugaev V. G.** Rezul'taty jekspluatacionnyh ispytanij burov ljogkoj serii. *Mezhvuz. sb. nauch. tr. s mezhdunar. uchastiem*. Pod red. S. P. Eresko. Transportnye sredstva Sibiri. Vyp. 10. Krasnojarsk: IPC KGTU, 2004. P. 409—424.

8. **Bugaev V. G., Eresko S. P.** Issledovanie linejnogo iznosa burovых rezcov, naplavlennyh iznosostojkimi materialami. *Mezhvuz. sb. nauch. tr. s mezhdunar. uchastiem*. Pod red. S. P. Eresko. Transportnye sredstva Sibiri. Vyp. 8. Krasnojarsk: IPC KGTU, 2002. P. 501—507.

9. **Vasil'ev S. I., Eresko S. P., Zhubrin V. G., Osipenko B. V.** Prognozirovanie uslovij razrabotki sezonno-mjorzlyh gruntov Vostochnoj Sibiri. *Nauka i tehnika v dorozhnoj otrasli*. Vyp. 4. 2010. P. 35—38.

10. **Bugaev V. G., Eresko S. P.** *Burovoj rezhushhij instrument*. Pod obshh. red. S. P. Eresko. Krasnojarsk: Sib. fed. un-t, 2011. 276 p.

УДК 622.27

**Л. А. Крупник**, д-р техн. наук, проф., КазНТУ им. К. И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан,  
**Ю. Н. Шапошник**, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., ИГД им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск,  
**С. Н. Шапошник**, д-р техн. наук, проф., ВКГТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

E-mail: leonkr38@mail.ru; shaposhnikyury@mail.ru; shaposhniksergey@mail.ru

## Перспективные направления транспортирования закладочной смеси в шахту на горно-добывающих предприятиях Казахстана

---

*Статья посвящена вопросам разработки рациональных схем и способов транспортирования закладочных смесей в шахту на горно-добывающих предприятиях Казахстана. Проведен анализ схем транспортирования закладочной смеси в шахту на горно-добывающих предприятиях Казахстана. Приведены проектные параметры трубопроводного транспорта смесей для ряда подземных рудников. Выявлены зависимости реологических свойств смесей от количества в их составе добавок пластификатора. Определены структура и химический состав образцов-кубов закладочного массива, сформированных из смеси, применяемой в настоящее время на горно-добывающих предприятиях Казахстана. Предложены новые схемы приготовления и транспортирования закладочных смесей в шахту, а именно, приготовление закладки на поверхностной растворобетоно-смесительной установке, транспортирование смеси в шахту по вертикальному стволу трубопровода и в шахте самоходными миксерами и подача закладки в пустоты отработанных камер с помощью насосов по трубопроводам. Новизна исследований заключается в определении реологических свойств закладочных смесей в зависимости от содержания вяжущего и добавок пластификатора. Представленные результаты могут быть использованы при проектировании и эксплуатации бетонозакладочных комплексов на горно-добывающих предприятиях.*

**Ключевые слова:** закладочные смеси, схемы приготовления и транспортирования закладочных смесей в шахту, реологические свойства смесей

### Анализ схем транспортирования закладочной смеси в шахту на горно-добывающих предприятиях Казахстана

Добычу полиметаллической руды системами разработки с закладкой на сегодняшний день в Восточном Казахстане осуществляют на Малеевском руднике Зыряновского ГОКа, Тишинском, Риддер-Сокольном и Шубинском рудниках Риддерского ГОКа ТОО "Казцинк", Орловском и Артемьевском рудниках ТОО "Корпорация "Казахмыс". Планируется применение систем разработки с закладкой выработанного пространства для выемки запасов руд в предохранительных целиках Суздальского месторождения финансово-инвестиционной корпорацией "Алел". Представляется весьма вероятным использование систем разработки с закладкой при отработке Секисовского месторождения ДТОО "Горнорудное предприятие "Секисовское" компании "Hambleton mining company Limited", месторождения Теллур ТОО "Акмола Голд", а также при выемке золото-содержащих руд на Бакырчикском месторож-

дении ТОО "Бакырчикское горнодобывающее предприятие".

Использование твердеющей закладки в технологическом процессе добычи руды дает возможность сократить потери и разубоживание рудной массы, обрабатывать запасы руд в охранных целиках и сохранять земную поверхность от обрушения при обеспечении безопасности горных работ. Вместе с тем системы разработки с закладкой требуют крупных капитальных вложений на строительство поверхностных бетонозакладочных комплексов (БЗК) и, как показывает практика, значительного периода времени [1]. При сложившемся в настоящее время дефиците финансовых средств для горно-добывающих предприятий особую значимость приобретает разработка менее затратных технологических путей ведения закладочных работ при условии обеспечения безопасности ведения горных работ.

Выбор способа подачи закладочных смесей во многом зависит от рецептуры закладочных смесей для закладки пустот отработанных выемочных

единиц на подземных рудниках, предопределяющих прочностные, деформационные и пластичные свойства закладочного массива, реологические характеристики закладочных смесей, а также от необходимых объемов подачи закладки и взаимного расположения пустот отработанных камер и поверхностных БЗК.

В настоящее время на многих рудниках подача закладки с поверхностных БЗК в шахту осуществляется в *самотечном режиме*, например на Малеевском руднике Зыряновского ГОКа ТОО "Казцинк", при составе закладочной смеси: цемент М-400 — 60 кг/м<sup>3</sup>; гранулированный шлак (граншлак) молотый, класс -0,08 — 120 кг/м<sup>3</sup>; граншлак молотый, класс +0,08 — 120 кг/м<sup>3</sup>; пески отвалыные +2,5 — 470 кг/м<sup>3</sup>; легкая фракция +2,5 — 705 кг/м<sup>3</sup>; вода — 460 кг/м<sup>3</sup> закладки. Готовая закладочная смесь с БЗК-1, 2 транспортируется по закладочному вертикальному ставу бетоновода диаметром 168 мм до 11-го горизонта и далее по закладочному трубопроводу (бетоноводу) диаметром 168 мм, проложенному по горизонтальным и вертикальным выработкам, до закладываемой камеры.

Дальность подачи по трубопроводу в самотечном режиме закладочных смесей определяется соотношением

$$H:L = 1:5; 1:7,$$

где  $H$  — суммарная длина вертикальных участков закладочного трубопровода, м;  $L$  — суммарная длина горизонтальных участков закладочного трубопровода, м.

При закладке пустот отработанных камер, расположенных незначительно выше уровня закладочного горизонта, необходимо проводить проверочный расчет трубопроводного транспорта закладочной смеси по условию необходимого давления у устья закладочной скважины.



Рис. 1. Схема транспортирования закладочной смеси в камеру № 55 Родниковой рудной зоны Малеевского месторождения

Условие самотечного транспортирования закладочной смеси в камеру, расположенную выше закладочного горизонта, например камеру № 55 Родниковой рудной зоны Малеевского месторождения будет выполнено, если остаточное давление в конце горизонтального участка бетоновода  $P_{ост}$  будет превышать давление, создаваемое гидравлическим напором закладочной смеси в восходящей закладочной скважине  $P_{скв}$  (рис. 1):

$$P_{ост} > P_{скв}; P_{ост} = H\rho k_1 - lL\rho k_1 k_2 k_3;$$

$$P_{скв} = h_{скв}\rho k_3,$$

где  $H$  — высота вертикального става бетоновода, м;  $\rho$  — плотность закладочной смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $l$  — удельные потери напора, м/м;  $L$  — длина горизонтального участка бетоновода, м;  $k_1$  — коэффициент заполнения вертикального става бетоновода;  $k_2$  — коэффициент надежности;  $k_3$  — коэффициент местных сопротивлений;  $h_{скв}$  — превышение уровня подачи закладочной смеси в камеру над уровнем горизонта транспортирования.

В результате проведенных расчетов установлено, что  $P_{ост} = 0,95$  МПа,  $P_{скв} = 0,45$  МПа. Таким образом, условие  $P_{ост} > P_{скв}$  выполнено, что обеспечивает самотечный транспорт закладочной смеси в камеру № 55 при превышении уровня подачи закладочной смеси в камеру над уровнем горизонта транспортирования  $h_{скв} = 21$  м;  $H = 382$  м;  $L = 1580$  м.

В настоящее время на Малеевском руднике возникла необходимость выбора варианта закладки пустот отработанных камер в этаже 7...11-го горизонтов Малеевской рудной зоны (выше уровня закладочного горизонта до 200 м).

Для решения возникшей проблемы руководством ТОО "Казцинк" к практической реализации предлагаются два варианта:

вариант 1 — размещение на горизонтальном ставе смонтированного по квершлагу шахты "Малеевская" шламового двухпоршневого насоса KOS 25.100 НР фирмы "Putzmeister AG" с электрогидравлическим приводом, который будет осуществлять напорную подачу закладочной смеси с 11-го горизонта на вышележащие горизонты;

вариант 2 — строительство на верхней промышленной площадке Малеевского рудника БЗК-3, с которого в самотечном режиме через две вертикально пробуренные скважины будет осуществляться подача закладочной смеси в отработанное пространство верхних горизонтов Малеевской и Октябрьской рудных зон (рис. 2).

Поршневой шламовый насос KOS 25.100 рассчитан на подачу закладочной смеси с рабочим давлением до 100 бар при производительности  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Для привода насоса KOS 25.100 применяется электрогидравлический агрегат НА 400 Е мощностью 400 кВт.

Анализ выполненных расчетов специалистами ТОО "Казцинктех" чистой текущей стоимости по вариантам подачи закладочной смеси на верхние горизонты Малеевской рудной зоны на период 2009—2017 гг. показал, что более целесообразным и экономически привлекательным вариантом закладки верхних горизонтов Малеевского рудника является приобретение и монтаж шламового насоса KOS 25.100 НР фирмы "Putzmeister AG", который будет осуществлять напорную подачу закладочной смеси на вышележащие горизонты. При разнице капитальных затрат 715 тыс. долл. США между вариантами 1 и 2 разница чистой текущей стоимости между этими вариантами при ставке дисконта 12,5 % составила 1435 тыс. долл. США.

Схемы подачи закладочной смеси с поверхностных закладочных скважин в шахту по трубопроводам приняты для проектируемых подземных рудников Восточного Казахстана, таких как Ново-Ленинбургский, Обручевский, Долинный, Секисовский, Теллур и Бакырчик. Так, на Ново-Ленинбургском руднике ТОО "Казцинк" при производительности поверхностного БЗК 770 тыс.  $\text{м}^3$  закладки/год диаметр транспортного трубопровода определяется по формуле [2]

$$d_{\text{тр}} = \sqrt{\frac{4Q_{\text{т}}}{\pi v_{\text{р}} 3600}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 150}{3,14 \cdot 1,5 \cdot 3600}} = 0,188 \text{ м},$$

где  $Q_{\text{т}}$  — техническая (часовая) производительность закладочного комплекса,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $v_{\text{р}}$  — рабочая скорость движения закладочной смеси по транспортному трубопроводу, м/с.

По ГОСТ 8732—78 [3] диаметр трубопровода (внутренний) принят  $d_{\text{вн}} = 183 \text{ мм}$ .

Техническая (часовая) производительность закладочного комплекса при годовой производительности БЗК  $Q_{\text{год}} = 770 \text{ тыс. м}^3$  закладки составляет

$$Q_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{год}}}{T} = \frac{770\,000}{305 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 0,75} = 150 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

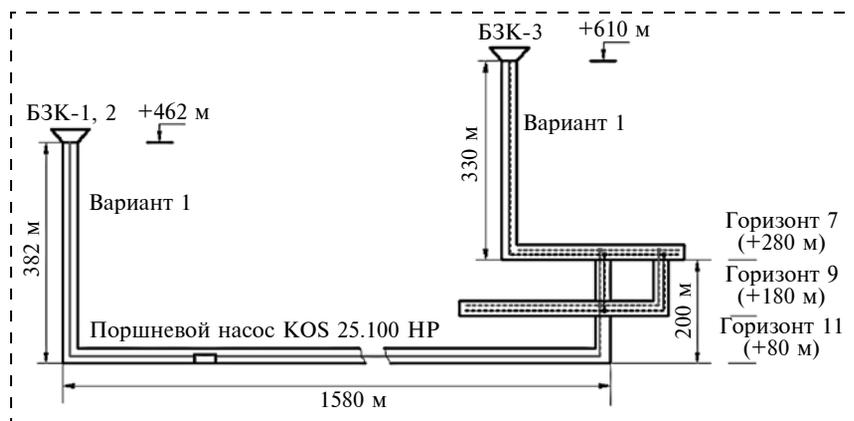


Рис. 2. Схемы закладки пустот отработанных камер в этаже 7...11-го горизонтов

Согласно нормам технологического проектирования [4, 5] годовой фонд работы закладочного комплекса определен по формуле

$$T = Nntk_{\text{и}}, \text{ ч},$$

где  $N$  — число рабочих дней в году,  $N = 305$ ;  $n$  — число смен в сутки,  $n = 3$ ;  $t$  — продолжительность смены, ч,  $t = 7$  ч;  $k_{\text{и}}$  — коэффициент использования оборудования,  $k_{\text{и}} = 0,75$ .

Таким образом, при потребности в твердеющей закладке в объеме 770 тыс.  $\text{м}^3/\text{год}$  техническая производительность закладочного комплекса проектируемого Ново-Ленинбургского рудника должна составлять  $150 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Уточненное значение рабочей скорости движения смеси по транспортному трубопроводу рассчитывается по формуле

$$v_{\text{р}} = \frac{K4Q_{\text{т}}}{\pi d_{\text{тр}}^2 3600} = \frac{1,15 \cdot 4 \cdot 150}{3,14 \cdot 0,183^2 \cdot 3600} = 1,82 \text{ м/с},$$

где  $K = 1,15$  — коэффициент, учитывающий увеличение расхода смеси за счет аэрации в вертикальном ставе.

В соответствии с требованиями [4] минимальную толщину стенок стальных трубопроводов, работающих под внутренним давлением, определяем по формулам

$$\delta_{\text{р}} = \frac{n_{\text{д}} p_{\text{р}} d}{2(R_1 + n_{\text{д}} P)} = \frac{1,15 \cdot 8,97 \cdot 0,119}{2 \cdot (250 + 1,15 \cdot 8,97)} = 4,02 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

или

$$\delta_{\text{р}} = \frac{n_{\text{д}} p_{\text{р}} d}{2R_2} = \frac{1,15 \cdot 8,97 \cdot 0,119}{2 \cdot 230} = 4,46 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

где  $n_d$  — коэффициент допустимого превышения рабочего давления в трубопроводе,  $n_d = 1, 1, \dots, 1, 2$ ;  $p_p$  — рабочее давление в нижней части вертикального трубопровода, МПа;  $P$  — наибольшее давление в трубопроводе (на начальном участке), МПа;  $d$  — внутренний диаметр закладочного трубопровода, м;  $R_1$  — расчетное сопротивление трубной стали по пределу прочности, для стали Ст 20  $R_1 = 250$  МПа;  $R_2$  — расчетное сопротивление трубной стали по пределу текучести, для стали Ст 20  $R_2 = 230$  МПа.

Фактическая толщина стенки закладочного трубопровода принимается с учетом коррозионного гидроабразивного изнашивания

$$\delta_{\text{ф}} = \delta_p + \delta_k + \delta_r = 4,46 + 2,25 + 2,5 = 9,81 \text{ мм},$$

где  $\delta_k = \delta_1 + \delta_2$  — предусматривает увеличение расчетной толщины стенки трубы на величину отрицательного допуска при изготовлении труб  $\delta_1$  и на коррозионные потери металла  $\delta_2$ , мм;  $\delta_r$  — гидроабразивное изнашивание с учетом профилактического проворачивания трубопровода на угол  $120^\circ$ .

В соответствии ГОСТ 8732—78 для труб со стенками толщиной до 15 мм включительно отрицательный допуск составляет 15 %.

Значение  $\delta_2$  определяется по формуле

$$\delta_2 = (\alpha_1 + \alpha_2) T_c = (0,25 + 0,2) \cdot 5 = 2,25 \text{ мм},$$

где  $\alpha_1$  — скорость коррозии материала наружной поверхности трубопровода, мм/год;  $\alpha_2$  — скорость коррозии материала внутренней поверхности трубы, мм/год;  $T_c$  — расчетный срок службы трубопровода, год.

Таким образом, для условий Ново-Лениногорского рудника окончательно принимаем толщину стенки закладочного трубопровода  $\delta_{\text{ф}} = 10$  мм и трубу со следующими характеристиками: внутренний диаметр трубопровода  $d_{\text{вн}} = 199$  мм; наружный диаметр трубопровода  $d_{\text{н}} = 219$  мм; масса 1 м трубы — 51,54 кг.

При проектной производительности поверхностного БЗК рудника Теллур ТОО "Акмола Голд" 25 тыс. м<sup>3</sup>/год для транспортирования закладочной смеси по вертикальному магистральному трубопроводу приняты трубы стальные бесшовные горячедеформированные (ГОСТ 8731—74, ГОСТ 8732—78) с наружным диаметром 83 мм и толщиной стенки 6 мм (труба 89 × 6—30ХГСА, ГОСТ 8732—78), для горизонтального магистрального бетоновода — труба 89 × 6—30ХГСА, ГОСТ 8732—78. Транспорт закладочных смесей в самотечном режиме возможен по горизонтальному участку на длину до 320 м, что полностью соот-

ветствует условиям отработки месторождения Теллур.

### Пути повышения текучести закладочных смесей

В настоящее время на многих месторождениях полезных ископаемых, в том числе и на Риддер-Сокольном месторождении, отработка рудных запасов осуществляется на флангах месторождений за пределами самотечного режима транспортирования закладочной смеси, в связи с чем планируемое расширение объемов добычи руды с литыми твердеющими смесями ограничивается высокой стоимостью закладки, что резко повышает себестоимость добычи руды, и отсутствием решений по транспортированию закладочной смеси в отдаленные блоки.

Анализ опыта работы поверхностных БЗК на подземных рудниках выявил существенные недостатки самотечно-пневматического режима транспортирования закладочной смеси:

в закладочном трубопроводе создается повышенное давление, что приводит к быстрому износу труб;

низкая производительность по закладке из-за необходимости частой промывки и продувки трубопровода и других вспомогательных работ;

повышенная себестоимость закладочных работ из-за высокого расхода сжатого воздуха (на доставку 1 м<sup>3</sup> смеси на 1 км расходуется 100...130 м<sup>3</sup> сжатого воздуха);

старение литых твердеющих смесей (ЛТС) в трубопроводе и образование закладочных массивов слоистой структуры с фактической прочностью, не отвечающей нормативным требованиям.

Для решения задач по разработке технологии, дающей возможность подавать закладку на большие расстояния, и снижению расхода дорогостоящего цемента были определены основные направления исследований: применение насосов напорной подачи закладочного материала; использование в составе закладочной смеси химических добавок пластификатора. Решение задач трубопроводного транспортирования литых закладочных смесей за пределами длины самотечного участка возможно на основе использования гидродинамических активаторов [6] или поршневых высоконапорных насосов, в частности фирмы "Engineering Dobersek GmbH". Например, бетононасос BSA 14000 HP-E обеспечивает производительность по подаче абразивной закладочной смеси (плотность смеси 1,85...1,95 т/м<sup>3</sup>, содержание твердого по массе 75 %,

удельная плотность твердого  $2,8 \text{ т/м}^3$ )  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$  при давлении 150 бар. При этом обеспечиваются длина подачи смеси по горизонтальному участку до 2500 м и максимальная высота подачи 220 м при скорости транспортирования смеси  $1,65 \text{ м/с}$ . Одним из основных преимуществ данного насоса являются абсолютная герметичность и высокая износостойкость рабочих деталей. Благодаря этому он надежно и гарантировано подает абразивные закладочные или бетонные смеси с крупной фракцией. На закладочной трубопроводной сети при использовании бетононасоса BSA 14000 HP-E монтируются следующие автоматизированные системы: аварийного отключения и перераспределения потока бетонной смеси; промывки бетоновода; стабилизации работы бетононасоса и управления режимом работы трубопровода.

Другим путем увеличения текучести ЛТС является использование в составе закладочной смеси химических добавок пластификатора. Они являются регуляторами реологических свойств твердеющих закладочных смесей и используются в целях повышения транспортабельности, уменьшения расслоения закладочных смесей, улучшения качества заполнения выработанного пространства при повышении удобоукладываемости смеси, регулирования сроков схватывания.

На сегодняшний день выпускается достаточно большой ассортимент химических добавок отечественного и зарубежного производства. Добавки пластификатора существенно разжижают закладочную смесь, обволакивая зерна цемента и заполнителей, создавая совместно с водой скользящую пленку. Благодаря этому снижается трение между твердыми компонентами закладочной смеси и увеличивается ее подвижность.

В результате проведенных лабораторных исследований и опытно-промышленных исследований на БЗК Риддер-Сокольного рудника установлено, что использование в составе закладочной смеси (цемент —  $140 \text{ кг/м}^3$ ; текущие хвосты —  $1288 \text{ кг/м}^3$ ; вода —  $476 \text{ кг/м}^3$ ) химических добавок типа Pozzolith дает возможность снизить расход дорогостоящего цемента при приготовлении закладочной смеси на  $12...15 \text{ кг/м}^3$  при условии сохранения прочностных характеристик закладочного массива, повысить подвижность смеси на 20 % (рис. 3), увеличить среднюю скорость истечения смеси с добавкой пластификатора Pozzolith MR 55 из емкости (при дозировке добавки  $1,0 \text{ кг/м}^3$ ) примерно на 50 % по сравнению с применяемым компонентным составом закладочной смеси, что

дает возможность вовлечь в отработку участки рудных залежей на флангах месторождений полезных ископаемых.

Пластификатор Pozzolith MR 55 производства компании "BASF" является жидкой бетонной добавкой для придания текучести, не содержащей хлор, на основе лигносульфоната позволяет продолжительное время сохранять подвижность смеси и имеет следующие характеристики: плотность  $1170...1190 \text{ кг/м}^3$ , водородный показатель pH  $4...6$ ; содержание Cl-иона, масс. %, не более 0,1. Эта добавка увеличивает сопротивляемость к работе на изгиб и обрабатываемость за счет использования меньшего количества воды.

Когда в бетон добавляют добавку, то она абсорбируется с частицами цемента. Частицы цемента отталкиваются друг от друга электростатической силой. Таким образом, облегчая движение частиц цемента, текучесть бетона достигается при малом количестве воды. За счет уменьшения количества воды соответственно достигается набор роста сил ранней и конечной прочности бетона. Вместе с уменьшением пропорции вода/цемент смесь Pozzolith MR 55 с бетоном получает большую гомогенность и текучесть, в значительной мере увеличивает непроницаемость бетона.

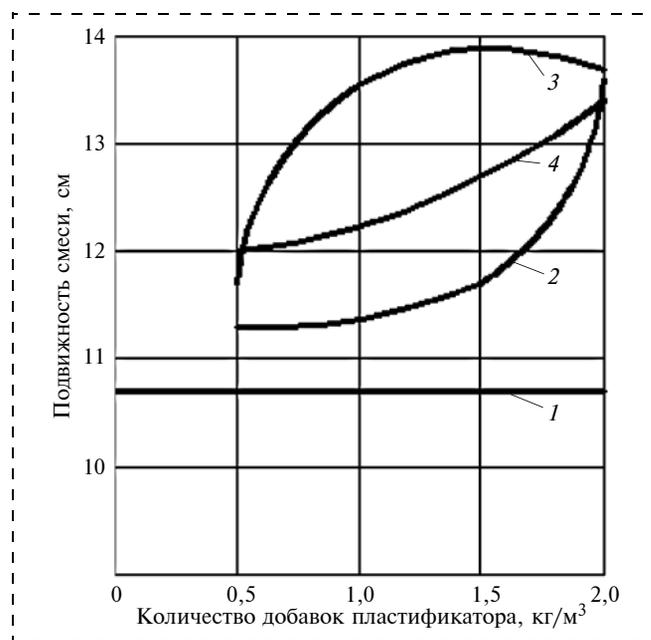


Рис. 3. Изменение подвижности закладочной смеси с использованием добавок пластификатора (при следующем составе смеси: цемент —  $140 \text{ кг/м}^3$ ; текущие хвосты —  $1288 \text{ кг/м}^3$ ; вода —  $476 \text{ кг/м}^3$ , отношение Т:Ж в текущих хвостах — 73:27): 1 — без использования добавок; 2—4 — с использованием добавок пластификаторов соответственно Pozzolith MR 25, Pozzolith MR 55 и Pozzolith 100 XR в пределах  $0,5 \text{ кг/м}^3 \leq q \leq 2,0 \text{ кг/м}^3$

Исследования на растровом электронном микроскопе JSM-6390LV (Япония) с энергодисперсионной приставкой EDS фирмы "Oxford" позволили определить структуру и вещественный состав образцов-кубов закладочного массива, сформированных из смеси, применяемой в настоящее время на Риддер-Сокольном руднике, и с добавкой пластификатора Pozzolith MR 55. Установлено, что весовая масса химических элементов Si и O в составе закладочной смеси наибольшая при содержании добавок пластификатора в пределах 0,5...1,0 кг/м<sup>3</sup> (рис. 4), что обеспечивает пониженную скорость твердения закладочного массива в начальные сроки при достаточно интенсивном наборе прочности в более поздние сроки твердения, а введением в состав закладки добавок пластификатора обеспечивается текучесть закладочной смеси при относительно малом количестве воды.

В результате технико-экономических расчетов выявлено, что использование гидродинамических активаторов и высоконапорных бетононасосов из-за их высокой стоимости и значительного износа на сегодняшний день на БЗК Риддер-Сокольного рудника нецелесообразно.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что использование добавок пластификатора в составе закладочной смеси позволяет в зависимости от дозировки добавки

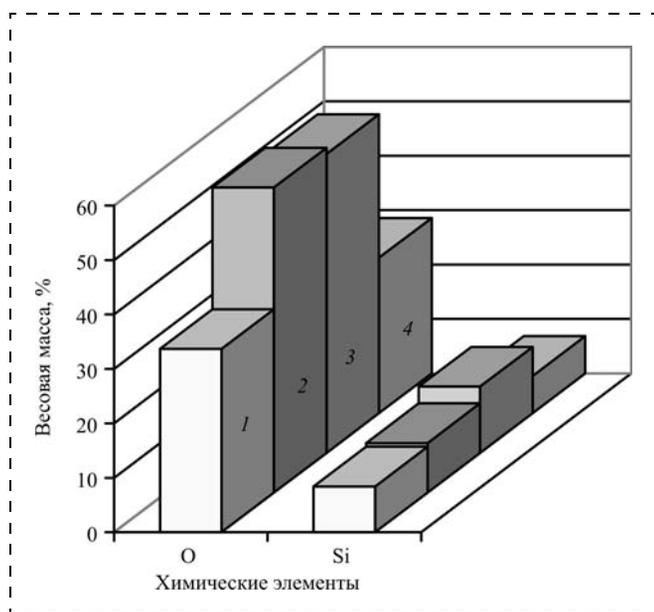


Рис. 4. Диаграмма содержания химических элементов Si и O в составе закладочной смеси при присутствии добавок пластификатора: 1 — без добавки пластификатора; 2 — с добавкой пластификатора 1,0 кг/м<sup>3</sup>; 3 — с добавкой пластификатора 0,5 кг/м<sup>3</sup>; 4 — с добавкой пластификатора 1,5 кг/м<sup>3</sup>

повысить подвижность смеси на 20 % при сохранении прочностных характеристик закладочного массива, а также вовлечь в разработку удаленные участки рудных залежей на флангах месторождений полезных ископаемых Восточного Казахстана.

Исследования, проведенные сотрудниками ДПП "ВНИИцветмет" на Орловском руднике Жезкентского ГОКа ТОО "Корпорация "Казахмыс", показали, что добавка золы-уноса Аксуской ТЭС в количестве 200...350 кг/м<sup>3</sup> для закладочных смесей с цементно-зольным вяжущим позволяет снизить коэффициент расслаиваемости с 1,35...1,45 до 1,3...1,2, уменьшить водоотделение, снизить предельное напряжение сдвига. В результате обеспечивается по сравнению с контрольными составами снижение расхода портландцемента на 50...70 кг/м<sup>3</sup> и создаются требуемые условия самотечного режима транспорта закладочной смеси [7, 8]. Сравнение прочностных характеристик составов закладки с использованием в качестве вяжущего портландцемента (ПЦ) и шлакопортландцемента (ШПЦ) производства АО "Central Asia Cement", золы-уноса ТЭС г. Аксу, а также добавок пластификатора MR 55 для условий месторождения Теллур показало, что прочность закладочного массива при использовании ШПЦ выше аналогичного состава с применением ПЦ на 15 % в возрасте 14 сут и на 20 % в возрасте 28 сут. Кроме прочностных характеристик закладки весьма существенное влияние на качество формируемых закладочных массивов, особенно при слоевых системах разработки, оказывают и реологические свойства закладочной смеси. Снижение предельного напряжения сдвига  $\tau$  от количества цемента в составе закладочной смеси  $q_{Ц}$  объясняется повышенным объемом затворителя в составе смеси и описывается следующими выражениями:

на основе ПЦ

$$\tau_1 = 318,26 - 17,13 \lg q_{Ц};$$

на основе ПЦ с добавкой MR 55

$$\tau_2 = 606,06 - 158,31 \lg q_{Ц};$$

на основе ШПЦ с добавкой MR 55

$$\tau_3 = 18,39 - 169,81 \lg q_{Ц};$$

на основе ПЦ с добавкой сухой золы

$$\tau_4 = 330,63 - 61,52 \lg q_{Ц};$$

на основе ПЦ с добавкой сухой золы и MR 55

$$\tau_5 = 346,15 - 74,58 \lg q_{Ц};$$

на основе ШПЦ с добавкой сухой золы и MR 55

$$\tau_6 = 127,83 - 52,49 \lg q_{Ц}.$$

Сравнение реологических свойств составов закладки показало, что подвижность смеси с использованием ПЦ выше аналогичного состава

с применением ШПЦ на 11 % (соответственно 12,0 и 10,8 см), предельное напряжение сдвига у состава с ПЦ ниже на 67 % (соответственно 166,8 и 248,6 Па). Это свидетельствует о лучшей текучести закладочных смесей с ПЦ. Следует отметить, что суммарное количество смешанного цементно-золяного вяжущего не должно быть менее 350...400 кг/м<sup>3</sup>. В противном случае не удастся получить закладочную смесь нужной транспортабельности даже при повышенном расходе воды [9].

### Разработка новых схем подачи закладочной смеси в шахту

В связи с необходимостью извлечения запасов руд в предохранительных целиках на Суздальском руднике АО "Финансово-инвестиционная компания "Алел" потребовалась разработка рациональных схем приготовления и транспортирования закладочной смеси на подземном руднике. Наиболее приемлемым вариантом подачи закладки в шахту может быть использование самоходных миксеров, например Р 715 Putzmeister, доставляющих закладочную смесь от поверхностной бетонорастворосмесительной установки (БРСУ) МВ-30WS производства "МЕКА" производительностью 30 м<sup>3</sup>/ч готового бетона до пустот отработанных камер, и последующая укладка бетонной смеси в выработанное пространство компактным прицепным насосом для подачи мелкозернистого бетона с инертным заполнителем крупностью до 20 мм [10]. В результате расчетов для транспортирования смеси насосом приняты трубы стальные бесшовные горячедеформированные (ГОСТ 8731—74, ГОСТ 8732—78) с наружным диаметром 127 мм и внутренним диаметром 113 мм (толщина стенки 9 мм). При этом одна установка насоса позволит осуществлять устойчивую доставку закладочной смеси на расстояние 250 м по горизонтали полюс 20 м по вертикали.

Для условий ДТОО "Горнорудное предприятие "Секисовское" компании "Hambledon Mining Company Limited" в целях обеспечения добычи руды в заданных объемах было предложено изменить схему подачи закладочной смеси в шахту, а именно: с БРСУ закладочную смесь транспортировать в шахту не миксером, а подавать закладку с БРСУ на нижележащие горизонты по скважинам или

восстающим и далее закладочную смесь развозить по горизонту миксерами с подачей смеси насосом по трубопроводу в пустоты отработанных камер [11].

### Список литературы

1. **Битимбаев М. Ж., Крупник Л. А., Шапошник Ю. Н.** Теория и практика закладочных работ при разработке месторождений полезных ископаемых. Алматы: ТОО РПИК "Дауір", 2012. 624 с.
2. **Инструкция** по транспортировке и механической укладке закладочных материалов при подземной добычи руд цветных, редких и драгоценных металлов. Усть-Каменогорск: ВНИИцветмет, 1985.
3. **ГОСТ 8732—78.** Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Сортамент.
4. **Нормы** технологического проектирования горнодобывающих предприятий с подземным способом разработки (методические рекомендации). Согласованы приказом Комитета по государственному контролю за чрезвычайными ситуациями и промышленной безопасностью Республики Казахстан от 4 декабря 2008 года, № 46.
5. **Нормы** технологического проектирования рудников цветной металлургии с подземным способом разработки. ВНТП 37—86. М.: Минцветмет СССР, 1986. 212 с.
6. **Анушенков А. Н., Фрейдин А. М., Шалауров В. А.** Приготовление литой твердеющей закладки из отходов производства // ФТПРПИ. 1998. № 1. С. 104—109.
7. **Квитка В. В., Фаустов С. И., Ананин А. И., Гамулка В. И.** Технология утилизации промышленных отходов металлургического производства на закладочных работах // Промышленность Казахстана. 2000. № 1. С. 66—67.
8. **Николаев Е. И., Гульязев В. Г., Кожбанов К. Х.** Новая технология приготовления твердеющей закладки на Орловском руднике // Горный журнал. 2002. № 5. С. 58—60.
9. **Крупник Л. А., Шапошник Ю. Н., Шапошник С. Н.** Пути улучшения прочностных свойств закладочных массивов при слоевых системах разработки // Горный журнал Казахстана. 2012. № 6. С. 15—17.
10. **Крупник Л. А., Демин В.Ф., Шапошник Ю. Н., Шапошник С. Н.** Выбор рациональной технологии закладочных работ на Суздальском руднике АО "ФИК "Алел" // Вестник КарГТУ. 2011. № 2 (43). С. 51—54.
11. **Нурсейтова Ж. Т., Ильясов А. А., Шапошник Ю. Н.** Разработка рациональной и безопасной технологии выемки запасов руд Секисовского месторождения подземным способом // Вестник ВКГТУ. 2014. № 2. С. 11—17.

**L. A. Krupnik**, Professor, e-mail: leonkr38@mail.ru,  
K. I. Satpaev Kazakh National Technical University, Almaty, Kazakhstan,  
**Yu. N. Shaposhnik**, Leading Researcher, e-mail: shaposhnikyury@mail.ru,  
N. A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia,  
**S. N. Shaposhnik**, Professor, e-mail: shaposhniksergey@mail.ru,  
D. Serikbaev East-Kazakhstan State Technical University, Ust'-Kamenogorsk, Kazakhstan

## Promising Technologies of Backfill Mixture Haulage in Mines of Kazakhstan

*The article addresses the development of rational flow charts and methods of backfill mixture haulage in Kazakhstan mines. The authors have analyzed actual backfill mixture haulage flow charts. The design parameters of pipelines for a number of mines have been given. The rheological properties of mixtures, related to the quantity of plastifier, have been defined as well as the structure and chemical composition of backfill mass test cubes made of the mixture used currently in mines of Kazakhstan. The new flow charts of backfill mixture preparation and haulage have been proposed. These flow charts imply preparation of backfill in surface mixers, its haulage into a mine by vertical pipelines and self-propelled mixers, and the supply of the backfill into mined-out voids by pipelines using pumps. The novelty of the investigations consists in defining rheological properties of backfill mixtures with their binder and plastifier content. The results presented in the article can be used for designing and exploitation of backfill preparation plants in mines.*

**Keywords:** backfill mixtures, flow charts of backfill mixture preparation and haulage, rheological properties of mixtures

### References

1. **Bitimbaev M. Zh., Krupnik L. A., Shaposhnik Ju. N.** *Teoriya i praktika zakladochnyh rabot pri razrabotke mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh*. Almaty: TOO RPIK "Daur", 2012. 624 p.
2. **Instrukcija po transportirovke i mehanicheskoj ukladke zakladochnyh materialov pri podzemnoj dobychi rud cvetnyh, redkih i dragocennyh metallov**. Ust'-Kamenogorsk: VNIICvetmet, 1985.
3. **GOST 8732—78**. *Truby stal'nye besshovnye gorjache-deformirovannye. Sortiment*.
4. **Normy tehnologicheskogo proektirovanija gornodobyvajushhih predpriyatij s podzemnym sposobom razrabotki (metodicheskie rekomendacii)**. Soglasovany prikazom Komiteta po gosudarstvennomu kontrolju za chrezvychajnymi situacijami i promyshlennoj bezopasnost'ju Respubliki Kazahstan ot 4 dekabrya 2008 goda, N. 46.
5. **Normy tehnologicheskogo proektirovanija rudnikov cvetnoj metallurgii s podzemnym sposobom razrabotki**. VNTP 37—86. M.: Mincvetmet SSSR, 1986. 212 p.
6. **Anushenkov A. N., Frejdin A. M., Shalaurov V. A.** Prigotovlenie litoj tverdejushhej zakladki iz othodov proizvodstva // *FTPRPI*. 1998. N. 1. P. 104—109.
7. **Kvitka V. V., Faustov S. I., Ananin A. I., Gamulka V. I.** Tehnologija utilizacii promyshlennyh othodov metallurgicheskogo proizvodstva na zakladochnyh rabotah. *Promyshlennost' Kazahstana*. 2000. N. 1. P. 66—67.
8. **Nikolaev E. I., Gul'tjaev V. G., Kozhbanov K. H.** Novaja tehnologija prigotovlenija tverdejushhej zakladki na Orlovskom rudnike. *Gornyj zhurnal*. 2002. N. 5. P. 58—60.
9. **Krupnik L. A., Shaposhnik Ju. N., Shaposhnik S. N.** Puti uluchshenija prochnostnyh svojstv zakladochnyh masivov pri sloevyh sistemah razrabotki. *Gornyj zhurnal Kazahstana*. 2012. N. 6. P. 15—17.
10. **Krupnik L. A., Demin V. F., Shaposhnik Ju. N., Shaposhnik S. N.** Vybor racional'noj tehnologii zakladochnyh rabot na Suzdal'skom rudnike AO "FIK "Alel". *Vestnik KarGTU*. 2011. N. 2 (43). P. 51—54.
11. **Nurseitova Zh. T., Il'jasov A. A., Shaposhnik Ju. N.** Razrabotka racional'noj i bezopasnoj tehnologii vyemki zapasov rud Sekisovskogo mestorozhdenija podzemnym sposobom. *Vestnik VKGTU*. 2014. N. 2. P. 11—17.

**И. В. Зырянов**, д-р техн. наук, зам. директора по научной работе,  
**Г. А. Мартынова**, канд. техн. наук, зам. гл. инж. по охране природы,  
Институт Якутнипроалмаз АК "АЛРОСА" (ОАО), г. Мирный, Якутия  
E-mail: ZyryanovIV@alrosa.ru; MartynovaGaA@alrosa.ru

## Оценка возможности повторного использования отработанных масел в АК "АЛРОСА" (ОАО) и выбор способов обращения с отходом в сложившихся условиях хозяйствования

*Рассмотрены способы обращения с отработанными маслами и рабочими жидкостями в сложившихся в АК "АЛРОСА" условиях хозяйствования. На основании оценки экономической эффективности комбинаций технологий по обезвреживанию отходов даны рекомендации по переработке и регенерации отработанных масел и технологических жидкостей с учетом возможностей современного оборудования.*

**Ключевые слова:** устойчивое развитие, способ обращения с отходом, регенерация отработанных масел и рабочих жидкостей, минимизация ущерба

### Постановка задачи обращения с отходом

АК "АЛРОСА" (ОАО) — ведущая алмазодобывающая компания мира, обеспечивающая четвертую часть объема мировой добычи алмазов, за свою более чем полувековую историю вошла в число крупнейших предприятий, занимая лидирующие позиции по физическим объемам добычи алмазного сырья. На ее предприятиях осуществляется полный цикл алмазодобычи — от геолого-разведки, добычи алмазов, их обогащения, сортировки и огранки до сбыта алмазной продукции.

Компания принимает на себя ответственность за последствия своей деятельности и стремится минимизировать потенциальный ущерб. Снижение негативного влияния на окружающую среду, рациональное использование недр и защита окружающей среды — приоритетные задачи в деятельности компании.

2012 г. стал знаменательным с позиций разработки и утверждения стратегических ориентиров: Наблюдательный совет утвердил Долгосрочный план развития АК "АЛРОСА" (ОАО) на 2012—2021 гг. Включение в этот документ экологических и социальных инвестиций является подтверждением приверженности компании курсу сбалансированного устойчивого развития.

В рамках Комплексной программы мероприятий по охране окружающей среды АК "АЛРОСА" (ОАО) на 2011—2018 гг. продолжаются работы по научно-техническому обеспечению природоохранной деятельности, поиску, разработке и вне-

дрению инновационных технологий в области обращения с отходами производства.

Основу производственного потенциала компании на территории Якутии составляют четыре горно-обогатительных комбината (ГОК) — Мирнинский, Удачный, Айхальский и Нюрбинский, ведущие разработку, обогащение, добычу и извлечение природных алмазов. Цеха технологического транспорта и горной техники этих подразделений, способные переместить миллионы кубических метров горной массы, оснащены грузовым транспортом импортного и отечественного производства, экскаваторами и буровыми машинами, погрузчиками и грузоподъемной техникой (рис. 1, см. 3-ю стр. обложки).

Обслуживание горной техники и механизмов связано с потреблением значительного количества горюче-смазочных материалов [1]. Ежегодно для производственных целей закупается более 2 тыс. т различных технических масел (моторных, гидравлических, трансмиссионных, промышленных, трансформаторных, редукторных и др.), из них около 33 % составляют масла отечественного производства. В процессе эксплуатации и обслуживания горной техники и оборудования образуются отработанные масла, которые относятся к III классу опасности для окружающей природной среды (в соответствии с СанПиН 2.1.7.1322—03 "Гигиенические требования к размещению и обезвреживанию отходов производства и потребления") [2]. В объеме образования отработанные моторные масла составляют 70 % (данные за 2014 г.).

Преимущественно ММО использовались в смеси с нефтью в качестве топлива в котельных.

В плане научно-исследовательских работ (НИР) института "Якутнипроалмаз" на 2012 г. была поставлена задача — дать технико-экономическую оценку возможности внедрения наилучших существующих технологий для повторного использования и утилизации отработанных масел в подразделениях АК "АЛРОСА" (ОАО): Айхальском, Удачинском, Мирнинском, Нюрбинском ГОКах и ПУ Алмаздортранс. Работа выполнена специалистами института "Якутнипроалмаз" АК "АЛРОСА" (ОАО) при участии кафедры "Нефтехимические технологии и оборудование" Омского государственного технического университета.

В качестве вариантов рассматривались следующие процессы:

регенерация отработанных масел на промышленных площадках цехов с применением собственных установок;

сжигание отработанных масел на компактных установках в целях выработки тепла и его использование в производстве (при наличии потребности в обеспечении теплом);

передача отработанных масел для утилизации сторонней (или дочерней) организации, имеющей лицензию на вид деятельности (обезвреживание).

### **Патентный обзор. Поиск эффективных технологий**

Единственным предприятием на территории Западной Якутии по обезвреживанию отходов классов I—IV опасности является ЗАО "Экология Пром Сервис" (г. Мирный, Якутия). При этом обезвреживание отработанных масел специализированным предприятием является довольно затратным по финансовым ресурсам [3]. Кроме того, в связи с переводом большинства котельных на газообразное топливо и вступлением в 2014 г. в действие запрета об использовании в качестве топлива для энергетических установок смеси отработанных масел и нефти (п. 3.8.3 ТР ТС 030/2012 "Технический регламент Таможенного союза. О требованиях к смазочным материалам, маслам и специальным жидкостям") поиск приемлемого варианта обращения с отходом для каждого ГОКа — актуальная задача природопользования ближайшей перспективы [4].

Патентный обзор применяемого оборудования по регенерации и утилизации отработанных масел выполнен лабораторией интеллектуальной

собственности (ЛИС) института "Якутнипроалмаз" АК "АЛРОСА" (ОАО). Объектом исследования (обзора) обозначены способы и устройства для повторного использования отработанных масел. Регламент поиска проведен по фонду патентной информации института "Якутнипроалмаз", электронным базам данных ведущих промышленных стран, Российской Федерации и СНГ, как наиболее информативным и определяющим основные тенденции развития в данной области, с ретроспективной 20 лет. Следует отметить, что в патентной информации не требуется приведение реальных параметров установок, фактов их внедрения и полученных от внедрения результатов. В связи с чем заявленный в патенте способ/устройство может быть не реализован(о) на практике.

В результате патентного поиска выявлено:

отсутствие охраняемых документов АК "АЛРОСА" (ОАО) по данной тематике;

в исследованном массиве охраняемых документов преобладают устройства и установки, использующие для регенерации отработанных масел физико-химические методы, такие как коагулирование, сорбция, ионный обмен, реагентная обработка, центрифугирование, фильтрование, теплофизические воздействия, воздействие силовых полей (гравитационного, центробежного, электрического, магнитного) и их комбинации;

регенерация во всех случаях представлена этапным процессом с применением различных методов извлечения загрязняющих веществ, дозированного введения композиций специальных присадок и лабораторного контроля качества продукта регенерации [5];

в качестве первоочередной ставится задача обеспечения высокого качества очистки отработанных масел при максимальном снижении затрат на используемое оборудование, оптимизация при упрощении технологии и обеспечение ее экологичности.

### **Свойства базовых масел. Эксплуатационные требования**

Существующая схема сбора отработанного масла в подразделениях компании не предполагает их отдельный сбор исходя из вида их дальнейшего использования — сжигание в котельных или смазка узлов и механизмов [6, 7].

Оценка возможности повторного использования отработанного масла после его регенерации напрямую связана с определением характеристик,

предъявляемых к смазочным материалам при эксплуатации узлов и агрегатов технических устройств. Для гидравлических регенерированных масел различных производителей требуется учет совместимости с резинотехническими изделиями, что влияет на работоспособность и срок замены манжет, сальников, уплотнений. Это особенно важно для дорогостоящих гидравлических систем импортной автомобильной и горной техники, особенно в период низких температур Крайнего Севера.

Большой информативностью обладает комплексный анализ таких текущих показателей масла, как кинематическая вязкость, щелочное и кислотное числа, содержание воды, загрязнений и цвет, наличие нерастворимых солей и металлов. По изменению этих физико-химических показателей работающих масел диагностируется техническое состояние отдельных узлов и агрегатов моторно-ходовой части технического средства.

Для правильной интерпретации результатов анализа масел в целях диагностирования их пригодности важно знать значения важнейших показателей состояния масла, допустимые к эксплуатации, для каждой конкретной марки. Ряд зарубежных изготовителей дизельных двигателей предоставляет такую информацию потребителям их продукции. Такие рекомендации для масел, соответствующих спецификации Electro-Motive Division (EMD), дает фирма и "Юнит Риг" (США) — для дизелей карьерных самосвалов.

Поскольку в работе узлов и механизмов применяются разные виды масел, необходимо понимать, в чем различие их химического состава. Все технические масла состоят из основы (базового масла) и присадок. В свою очередь, базовые масла подразделяются на минеральные (получены путем перегонки и очистки фракции нефти), синтетические (получены на основе синтеза карбоновой кислоты, получаемой из кокосовых орехов или семян рапса, содержащие полиизобутилен, полиальфаолеин и эстеры) и полусинтетические (получены комбинацией минеральных и синтетических основ, доля которой не менее 25 %).

Присадки, добавляемые в основу, улучшают эксплуатационные характеристики масел и подразделяются:

на вязкостно-загущающие (полиизобутилены, полиметакрилаты, виниполи, вольтоли и др.);

моющие (детергенты и дисперсанты), противоизносные (на основе фосфорсодержащих орга-

нических соединений — триалкилфосфатов, ди-тиофосфатов цинка и других металлов, серо- и хлорсодержащих веществ);

ингибиторы окисления и коррозии (сложные органические фосфор- и серосодержащие соединения);

антипенные (силиконовые полимеры — кремнийорганические соединения);

модификаторы трения (фосфор-, хлор-, серосодержащие соединения, которые при взаимодействии с металлом изменяют структуру его поверхностных слоев, снижая тем самым износ поверхностей трения);

депрессорные (понижают температуру застывания). Представлены парафлуо (повторяющиеся структуры ароматических колец с длинными парафиновыми цепями), сантопур (сложное ароматическое соединение, в состав которого входят атомы углерода, водорода, кислорода), акрилоид (продукт полимеризации эфиров) и др.

Одним из основных показателей работоспособности масел является вязкость. Для ее оценки обычно задают верхний и нижний пределы кинематической вязкости при 40 и/или 100 °С. Масло считают неработоспособным, если его вязкость увеличилась или уменьшилась по отношению к первоначальному значению на 25...30 %.

Температура вспышки — это показатель, напрямую взаимосвязанный с вязкостью. Разжижение масла топливом вызывает резкое ухудшение его противоизносных свойств, ускоряет процессы нагаро- и лакообразования на поршнях. Предельным считают снижение температуры вспышки на 40...50 °С.

При работе двигателя имеющиеся в масле присадки срабатываются. В результате снижается щелочное число, ухудшаются моющие свойства, повышается коррозия узлов трения. В присутствии воды в моторных маслах значительно ускоряется процесс старения присадок, снижается ресурс масла и двигателя. Для противоизносных присадок вода может служить катализатором их необратимого разложения с образованием осадка. При этом в моторном масле резко уменьшается концентрация антипенной присадки, регулирующей вспенивание масла в картере двигателя, происходит прекращение подачи масла к узлам трения и как результат — выход из строя двигателя. Это особенно важно при использовании современных масел с высокими моющими свойствами (высокощелочные сульфонаты), где для подавления пе-

нообразования вводятся повышенные концентрации антипенной присадки ПМС-200А. Важно отметить, что все эти процессы начинают проявляться уже при малых концентрациях воды, начиная от 0,05 %, что накладывает ограничения на условия хранения моторных масел и необходимость контроля этого показателя при эксплуатации двигателя, соответственно, и периодичность замены масла. Практика эксплуатации техники не допускает обводнения выше концентрации "следы", что является критерием предельного состояния пригодности для моторных масел.

Щелочное число является условной мерой способности масла нейтрализовать кислоты, образующиеся из продуктов сгорания топлива и основы масла, и косвенно характеризует наличие детергентно-диспергирующих присадок. Пределом работоспособности масла часто считают равенство общего щелочного числа общему кислотному числу. Современные моторные масла имеют достаточно высокий показатель щелочного числа — 7,5 мг КОН/г и более. Допустимое значение щелочного числа ограничивается 1,5...2,0 мг КОН/г. Эксплуатация двигателя на масле с щелочным числом ниже предельного ведет к ускоренному износу поршневых колец и цилиндров.

Содержание механических примесей в моторных маслах должно быть не выше 0,015 %. Наиболее опасны минеральные и металлические примеси. Значительное повышение концентрации того или иного элемента в масле свидетельствует об интенсивности изнашивания деталей, для которых этот элемент характерен. Например, по концентрации алюминия можно судить об износе поршней, по наличию хрома — об износе хромированных поршневых колец.

Для наблюдения за процессом изнашивания двигателя широко применяется способ определения железа в масле. С увеличением содержания железа в масле изменяются фрикционные, противоизносные, антиокислительные и моющие свойства масла. Предельное содержание железа в моторном масле для дизелей составляет примерно 0,01...0,02 %.

Таким образом, по изменению содержания таких компонентов, как вода, кальций, фосфор, цинк, магний, кремний и др., можно судить о качестве масла на данный момент эксплуатации техники.

Основные критерии предельного состояния масел приведены ниже.

#### Основные критерии предельного состояния масел

##### *Трансмиссионные масла:*

изменение вязкости на 30 %;  
содержание механических примесей не более 0,2 %;  
содержание воды не более 8 % (для масел группы ТМ5), не более 0,1 % (для масел групп ТМ1—ТМ4).

##### *Моторные масла:*

изменение вязкости: уменьшение на 25 %, увеличение на 35 % или переход масла в соседний класс по SAE;  
изменение щелочного числа: снижение не более чем на 50 % от значения показателя свежего масла;  
значение pH: 5...6 ед. pH;

содержание воды не более 0,1 %.

##### *Индустриальные масла и гидравлические жидкости:*

содержание механических примесей на уровне 14 класса по ГОСТ 17216—2001 0,008 % по массе;

содержание воды не более 0,1 %.

#### Исследование образцов отработанных масел

Для проведения комплексного физико-химического анализа отработанных масел были отобраны пробы:

№ 1 — общий сборник отработанных масел автобазы № 3 Мирнинского ГОКа;

№ 2 — пункт сбора масел в Каннских мастерских автобазы № 3 Мирнинского ГОКа;

№ 3 — отработанное масло после ТО автомобиля Volvo Мирнинского ГОКа (пробег 24 000 км, норма 25 000 км) — исходное масло Shell Rimula R4L15W40.

Анализ состава отработанных масел выполнен с использованием методов оптико-эмиссионного и инфракрасного спектрального анализа, результаты анализа состава отработанных масел представлены в табл. 1.

Анализ данных, приведенных в табл. 1, показывает, что гликоль в отработанных маслах не обнаружен, содержание воды ниже предела обнаружения. Топливо в небольшом количестве (2,2 %) обнаружено только в пробе № 1, в пробах № 2 и 3 содержание ниже предела обнаружения анализа. Все пробы отработанного масла содержат металлы износа, такие как железо, хром, свинец и др. Также в пробах выявлены достаточно высокие концентрации фосфора и цинка, что указывает о сохранении маслом противоизносных свойств, а высокое содержание магния и кальция — на наличие моющих присадок.

Обратимся к технологиям переработки отработанных масел. Анализ рыночных предложений, касающихся очистки масел, показал, что совре-

Таблица 1

## Результаты анализа состава отработанных масел

Показатель	Нормативный документ	Единица измерения	Проба № 1	Проба № 2	Проба № 3
<b>Физические показатели</b>					
Вязкость кинематическая при 40 °С	ГОСТ 33	мм <sup>2</sup> /с	64,08	68,65	94,68
Вязкость кинематическая при 100 °С	ГОСТ 33	мм <sup>2</sup> /с	9,24	10,05	13,27
Вода	ASTM D7417	Abs/см	<0,1	<0,1	<0,1
Окисление	ASTM E2412	Abs/см	4,4	5,8	8,2
Нитрация	ASTM E2412	Abs/см	<2,0	5,1	10,4
Гликоль	ASTM E2412	Abs/см	—	—	—
Сажа	ASTM E2412	% (масс.)	0,1	0,2	0,2
Топливо	ASTM E2412	Abs/см	2,2	<2,0	<2,0
<b>Химические показатели</b>					
Щелочное число	ГОСТ 11362	мг КОН/г	2,41	2,69	5,39
Кислотное число	ГОСТ 11362	мг КОН/г	2,23	2,41	2,80
Железо	ASTM D7417	г/г	73	120	43
Хром			8	16	8
Свинец			8	20	4
Медь			11	37	<2
Олово			<2	4	5
Алюминий			11	3	4
Никель			<2	<2	<2
Молибден			13	19	24
Титан			<2	<2	<2
Марганец			1	<1	<1
Ванадий			21	28	26
Кремний			55	36	12
Бор			2	3	3
Магний			246	340	316
Кальций			2523	1088	1105
Фосфор			656	457	528
Цинк			1440	1496	1295
Натрий			47	15	21
Калий			12	8	9

Примечание: "—" — not detected (не определено).

менные установки для регенерации отработанных масел позволяют в основном удалять механические примеси, воду и снижать кислотное число. Вместе с тем своевременное удаление из трансмиссионных, промышленных и гидравлических масел механических примесей и воды практически полностью восстанавливает их свойства. Регенерация же моторных масел — мероприятие затратное (практически строительство нефтеперерабатывающего завода малой производительности) и эффективное при больших объемах отхода (не менее 1000 т/мес) и возможности реализации продукта регенерации. Кроме того, регенерация моторных масел (для последующего использования в каче-

стве продукта для ДВС) нами исключается в связи с требованиями поставщика горно-транспортной техники к качеству моторных масел по условиям контрактов гарантийного и послегарантийного обслуживания и технического сопровождения. Ввиду того, что отработанные масла образуются в горно-обогажительных комбинатах в большом количестве, а регенерация возможна не для всех марок масел, часть масел рекомендуется все же сжигать на предназначенных для этого установках. Тепло может использоваться для обогрева производственных помещений, боксов авторемонтных мастерских. Данное направление использования тепла для АК "АЛРОСА" может рассматриваться как перспективное в местах размещения новых производственных мощностей или реконструкции существующих источников теплоснабжения, поскольку структура предприятия давно сложилась.

### Оценка экономической эффективности утилизации. Рекомендации по использованию оборудования

Расчет по варианту "сжигание" масел выполнен применительно к воздухонагревательным установкам СВ-3500-R-MP фирмы "Clean Burn" и водогрейным котлам СВ-350-СТВ-R-MP фирмы "Clean Burn, LLC" (США) (рис. 2, см. 3-ю стр. обложки). Основные технико-экономические параметры оборудования Clean Burn представлены ниже; виды обслуживающих работ в процессе эксплуатации оборудования, периодичность выполнения и нормы времени — в табл. 2.

#### Основные технико-экономические параметры оборудования Clean Burn

	СВ-3500-R-MP	СВ-350-СТВ-R-MP
Стоимость оборудования, руб. ....	519 332	680 504
Расход масла, л/ч .....	9,5	9,5
Потребляемая мощность, кВт .....	2,5	4,5
Тепловая мощность, Гкал/ч .....	0,08772	
Материалы и запчасти, руб./сервисный набор .....	8000	

Расчет по варианту "регенерация" выполнен для промышленных масел с применением установки ПСМ 2-4, а для регенерации дополнительно и гидравлических масел — с применением комбинации работы установок ПСМ 2-4 и СОГ 950КТ (рис. 3, см. 3-ю стр. обложки). Установка ПСМ 2-4 позволяет удалить воду и механические загрязнения размером свыше 15 мкм из высоковязких промышленных масел. При этом обладает высокой грязеемкостью, более высокой пропускной спо-

Таблица 2

**Виды обслуживающих работ в процессе эксплуатации оборудования Clean Burn, периодичность выполнения и нормы времени**

Вид работы	Периодичность выполнения	Норма времени, ч
Очистка стаканного фильтра	Каждые 800 ч	0,5
Обслуживание дозирующего насоса	Каждые 800 ч	0,5
Очистка камеры сгорания, газододов теплообменника, задней части теплообменника и дымовых труб от золы	Каждые 800 ч	4
Очистка фильтра "грубой" очистки	Каждые 800 ч	0,5
Удаление осадка из топливного бака	Ежемесячно	1,5
Очистка пламяудерживающей головки, замена форсунки, замена электродов, замена плунжеров, замена мембраны регулятора подачи воздуха	Каждые 800 ч	4
Промывка блока подогрева топлива	Каждые 800 ч	4

способностью по сравнению с СОГ 950КТ (очистка маловязких индустриальных масел и гидравлических жидкостей до 5...6-го класса чистоты). Стенды очистки жидкостей (СОГ) позволяют удалить из отработанных масел механические примеси и воду, обеспечивая 5...11-й класс чистоты (при исходном содержании примесей до 17-го класса). Компактность и мобильность стендов СОГ позволяют применять их непосредственно в местах работы оборудования. Основные технико-экономические параметры установок представлены ниже.

**Основные технико-экономические параметры установок по регенерации отработанных масел**

	ПСМ 2-4	СОГ 950КТ
Стоимость оборудования, руб. ....	329 600	237 800
Производительность, тн/ч .....	2,52	1
Потребляемая мощность, кВт .....	53,72	10
Периодичность ТО, ч .....		8
Продолжительность ТО, ч .....		1

Технико-экономическая оценка вариантов обращения с отработанными маслами (регенерация на установках, сжигание в целях выработки тепла, передача специализированной организации) показала, что наиболее экономически выгодна их комбинация — сжигание масла на теплогенерирующих установках и регенерация отработанных индустриальных масел и рабочих жидкостей на маслоочистительном оборудовании. Результат технико-экономической оценки вариантов обращения с отработанными маслами в Айхальском, Удачинском, Мирнинском, Нюрбинском ГОКах и ПУ "Алмаздортранс", выраженный через средний удельный эффект (тыс. руб./т), в период 2012—2021 гг. представлен в таб. 3. Начиная с 2015 г.

сжигание отработанного масла в котельных будет исключено в связи с переходом на природный газ.

Экономический эффект от сжигания отработанных масел на установках Clean Burn и регенерация отработанных масел и рабочих жидкостей при комбинации работы установок ПСМ 2-4 и СОГ 950КТ для Айхальского и Удачинского ГОКов близкий по значению и не превышает 48 тыс. руб./т. Оба комбината имеют сопоставимые условия хозяйственной деятельности (по стоимости ресурсов, транспортной удаленности от пунктов переработки отходов). Значительный удельный эффект для Нюрбинского ГОКа связан с его месторасположением, когда грузовые перевозки по доставке всех ресурсов обеспечиваются только воздушным транспортом. Самый низкий показатель удельного эффекта у ПУ "Алмаздортранс", в котором образуются преимущественно гидравлические масла, для их очистки достаточно работы только установки СОГ 950КТ. Очищенные от механических примесей и воды масла возвращаются в производство в качестве смазочного материала для дробильно-размольного оборудования, а гидравлические жидкости могут использоваться по прямому назначению. Регенерация моторных масел в практике предприятий не находит широкого использования в связи с высокой стоимостью мероприятия (сопоставимо с новым строительством минизавода) и необходимостью соблюдения требований производителя дизельных двигателей к качеству масла.

Компания "АЛРОСА" рассматривает вопросы управления в области охраны окружающей среды, основываясь на детальном изучении потребности своего производства в обеспечении ресурсами, рынка предложений в сфере оборудования по переработке отходов, затрат на внедрение этого оборудования, платежей за воздействие на окружающую среду, объема образования отходов потребления и удаленности мест расположения предприятий. Реализация программы перевода котельных на газообразное топливо обозначила вопросы оптимизации в использовании такого вторичного энергетического ресурса (в соответствии с ГОСТ 30772—2001), как отработанные масла. Однако оптимизация в использовании отработанных масел все же не позволяет АК "АЛРОСА" полностью отказаться от их сжигания. В случае сохранения процесса сжигания при обращении с отходом в целом суммарная составляющая этой оптимизации имеет положительный вектор — уменьшается количество сжи-

**Экономический эффект при обращении с отработанными маслами (сжигание на собственных установках и регенерация промышленных масел и рабочих жидкостей) в Айхальском, Удачинском, Мирнинском, Нюрбинском ГОКах и ПУ "Алмаздортранс" в период 2012—2021 гг.**

Наименование	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	Итого за 10 лет, тыс. руб.	Средний удельный эффект тыс. руб./т
<b>Айхальский ГОК</b>												
Грузооборот, тыс. ткм	300 966	308 058	322 207	332 574	332 500	332 500	332 500	329 664	318 596	315 586	—	—
Стоимость утилизации, тыс. руб.	26 177,62	26 967,18	27 231,78	26 360,92	14 174,15	13 942,71	13 439,12	12 840,48	11 978,32	10 431,11	206 839,72	—
Удельный эффект, тыс. руб./т	47,90	49,34	49,82	48,23	53,97	53,09	51,18	48,90	45,61	39,72	—	48,22
<b>Удачинский ГОК</b>												
Грузооборот, тыс. ткм	86 907	80 191	45 128	41 800	43 500	47 900	58 520	71 378	73 858	81 18	—	—
Стоимость утилизации, тыс. руб.	7008,49	5397,10	5675,75	6988,55	8596,42	11 962,28	17 577,52	27 454,61	31 420,93	36 065,11	165 544,60	—
Удельный эффект, тыс. руб./т	22,18	17,08	17,97	22,12	27,21	37,86	55,64	86,90	99,46	114,16	—	47,64
<b>Мирнинский ГОК</b>												
Грузооборот, тыс. ткм	51 143	50 000	50 000	50 000	50 000	50 000	50 000	50 000	50 000	50 000	—	—
Стоимость утилизации, тыс. руб.	7636,95	8329,11	8495,09	8760,67	8760,67	9208,83	9208,83	9009,64	8561,49	8561,49	95 194,49	—
Удельный эффект, тыс. руб./т	23,51	25,65	26,16	26,97	26,97	28,35	28,35	27,74	26,36	26,36	—	26,65
<b>Нюрбинский ГОК</b>												
Грузооборот, тыс. ткм	116 254	111 020	119 910	94 853	70 190	71 630	86 576	87 400	87 150	92 250	—	—
Стоимость утилизации, тыс. руб.	24 688,30	34 492,16	35 445,51	28 390,73	19 713,35	19 046,00	26 579,37	26 573,65	26 440,18	26 634,66	290 197,67	—
Удельный эффект, тыс. руб./т	75,60	105,62	108,54	86,94	60,36	58,32	81,39	81,37	80,96	81,56	—	80,78
<b>ПУ "Алмаздортранс"</b>												
Транзитные перевозки, тыс. ткм	217 275	256 587	252 572	257 802	260 072	259 782	259 782	259 782	259 782	259 782	—	—
Стоимость утилизации, тыс. руб.	364,57	430,53	423,80	432,57	436,38	435,89	435,89	435,89	435,89	435,89	4576,56	—
Удельный эффект, тыс. руб./т	8,85	10,45	10,29	10,50	10,59	10,58	10,58	10,58	10,58	10,58	—	10,10

гаемого отработанного масла. При этом процесс проводится на современных специализированных установках, что создает благоприятные условия для уменьшения выбросов углекислого газа — одного из компонентов состава атмосферы, избыток которого ведет к парниковому эффекту.

#### Список литературы

1. **Фукс И. Г., Евдокимов А. Ю., Лашхи В. Л.** Экологические проблемы рационального использования смазочных материалов. М.: Нефть и газ, 1993. 161 с.
2. **Гордукалов А. А., Школьников В. М.** и др. Рынок отработанных смазочных материалов в России // Мир нефтепродуктов. 2003. № 3. С. 2—5.

3. **Евдокимов А. Ю., Фукс И. Г.** и др. Комплексная схема переработки отработанных масел и смазок // Нефтепереработка и нефтехимия. 1990. № 1. С. 23—31.

4. **Reinhold B., Rolf H.** Технологии компании Meinken Engineering. В кн.: Новые технологии в переработке и утилизации отработанных масел и смазочных материалов / Тез. докл. конф. М.: РЭФИА, НИИ-Природа, 2003. 100 с.

5. **Юзефович В. И.** Регенерация отработанных смазочных масел и законодательство ЕЭС в этой области // Мир нефтепродуктов. 2003. № 2. С. 45—46.

6. **Лукса Адам.** Опыт совершенствования системы сбора и переработки отработанных смазочных материалов в Польше. В кн.: Смазочные материалы / Тез. докл. конф. Бердянск: Львовская политехника, 2006. С. 68—69.

7. **Юзефович В. И.** Организация сбора отработанных масел // Мир нефтепродуктов. 2003. № 3. С. 28—30.

I. V. Zyryanov, Deputy Director for Science, e-mail: ZyryanovIV@alrosa.ru,

G. A. Martynova, Deputy Chief Engineer for Environmental Protection, e-mail: MartynovaGaA@alrosa.ru,  
"Yakutniproalmaz" Institute of ALROSA (OJSC), Mirny, Yakutia, Russia

## Evaluation of Waste Oils Reuse in ALROSA (OJSC) and Selection of Waste Treatment Methods in the Current Economic Conditions

*The article presents an overview of waste oil and process fluids treatment methods in the current economic conditions in ALROSA. Based on the economic efficiency assessment of combinations of technologies for waste disposal, recommended practices on recycling and regeneration of waste oils and process fluids are offered taking into account the capabilities of modern equipment.*

**Keywords:** sustainable development, method of waste treatment, regeneration of waste oils and process fluids, damage minimization

### References

1. Fuks I. G., Evdokimov A. Ju., Lashhi V. L. *Jekologicheskie problemy racional'nogo ispol'zovanija smazochnyh materialov*. M.: Neft' i gaz, 1993. P. 161.

2. Gordukalov A. A., Shkol'nikov V. M. i dr. Rynok otrabotannyh smazochnyh materialov v Rossii. *Mir nefteproduktov*. 2003. N. 3. P. 2—5.

3. Evdokimov A. Ju., Fuks I. G. i dr. Kompleksnaja shema pererabotki otrabotannyh masel i smazok. *Neftepererabotka i neftehimija*. 1990. N. 1. P. 23—31.

4. Reinhold V., Rolf H. *Tehnologii kompanii Meinken Engineering*. V kn.: *Novye tehnologii v pererabotke i utilizacii*

otrabotannyh masel i smazochnyh materialov / Tez. dokl. konf. M.: RJeFIA, NIA-Priroda, 2003. P. 100.

5. Juzefovich V. I. Regeneracija otrabotannyh smazochnyh masel i zakonodatel'stvo EJeS v jetoj oblasti. *Mir nefteproduktov*. 2003. N. 2. P. 45—46.

6. Luksa Adam. *Opyt sovershenstvovanija sistemy sbora i pererabotki otrabotannyh smazochnyh materialov v Pol'she*. V kn.: *Smazochnye materialy*. Tez. dokl. konf. Berdjansk: L'vovskaja politehnika, 2006. P. 68—69.

7. Juzefovich V. I. Organizacija sbora otrabotannyh masel. *Mir nefteproduktov*. 2003. N. 3. P. 28—30.

III ЕЖЕГОДНАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ ВЫСТАВКА

ВУЗ  
ПРОМ  
ЭКСПО  
2015

ОТ ИДЕИ К РЕАЛЬНОСТИ

2-4 ДЕКАБРЯ 2015

Федеральная площадка для демонстрации потенциала современных технологий и научных изобретений России  
Научный шаг в будущее России

- БОЛЕЕ 100 ВУЗОВ,  
а также:
- ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПРЕДПРИЯТИЯ
- НАУЧНЫЕ ОРГАНИЗАЦИИ
- МАЛЫЕ ИННОВАЦИОННЫЕ ПРЕДПРИЯТИЯ
- ИНЖИНИРИНГОВЫЕ ЦЕНТРЫ
- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПЛАТФОРМЫ
- ГОСУДАРСТВЕННЫЕ КОРПОРАЦИИ
- ТЕРРИТОРИАЛЬНЫЕ ИННОВАЦИОННЫЕ КЛАСТЕРЫ

[vuzpromexpo.ru](http://vuzpromexpo.ru)

организаторы:



стратегические партнеры:



Технополис «Москва» г. Москва, Волгоградский проспект 42/13

УДК 622.23.037.008

**В. И. Александров**, д-р техн. наук, проф., **И. В. Егоров**, асп.,  
 НМСУ "Горный", г. Санкт-Петербург

E-mail: alexvict@spmi.ru; egorov\_iv@bk.ru

## Расчет глубины погружения буферной емкости в системах гидроподъема горной массы с морского дна

*В настоящее время не создано надежных и энергетически эффективных систем для разработки и транспортирования железомарганцевых конкреций с больших глубин морей и океанов на поверхность воды. Одним из наиболее важных аспектов при проектировании и разработке добычного комплекса является определение наименьшей глубины расположения буферной емкости, от которой зависят затраты на создание и эксплуатацию оборудования, так как с увеличением глубины повышаются длина трубопровода, жестко закрепленного с добычным судном, и давление воды, влияющее на конструктивные особенности и надежность оборудования, а также зависят затраты на обеспечение безопасности обслуживающего персонала.*

**Ключевые слова:** железомарганцевые конкреции, добычной комплекс, буферная емкость, гибкий трубопровод, гидросмесь, производительность, гидростатическое давление, концентрация

Подводный комплекс для разработки и транспортирования железомарганцевых конкреций (ЖМК) с больших глубин (рис. 1) включает горную машину (ГМ), осуществляющую отбойку и всасывание горной массы в виде гидросмеси в трубопровод специальной конструкции (ТСК). Трубопровод соединен с буферной емкостью (БФ), в которой поддерживается атмосферное давление. В БФ установлен зумпф для аккумуляции гидросмеси, поступающей по ТСК, а также насосная станция с грунтовыми насосами для подачи гидросмеси на борт добычного судна.

В работе [1] описана математическая модель подъема горной массы с морского дна посредством гидростатического давления, в которой приведены расчетные зависимости по определению глубины погружения БФ под водную поверхность:

$$h_б = i_г(H_p - h_б - h_{зп})K_c + h_{мп} = \frac{i_г(H_p - h_{зп})K_c + h_{мп}}{i_гK_c + 1},$$

где  $H_p$  — глубина в районе подводного месторождения;  $h_{зп}$  — глубина погружения сливного патрубка под уровень зумпфа в БФ;  $i_г$  — удельные потери напора в гибком трубопроводе;  $K_c$  — коэффициент, учитывающий изменения кривизны гибкого трубопровода при продвижении подводного забоя;  $h_{мп}$  — местные потери в системе.

Удельные потери напора в соответствии с [2] можно представить в виде выражения

$$i_г = i_0(1 + \Sigma i) = \left\{ \lambda \frac{v_{см}^2}{2gD} \left[ 1 + 145c_p \frac{gD}{v_{см}^2} \frac{w}{\sqrt{gD}} \right] \right\},$$

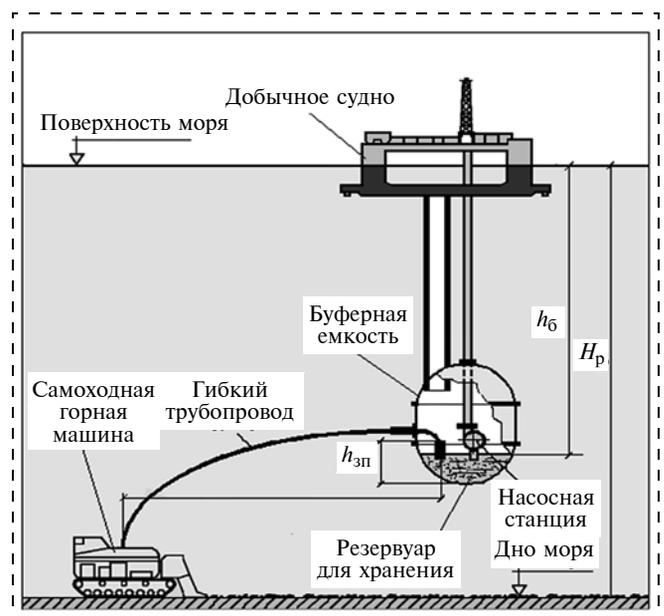


Рис. 1. Примерная схема модуля подводной добычи

где  $i_0$  — потери напора на течение чистой воды;  $\Sigma i$  — дополнительные потери напора на преодоление сопротивлений трения твердых частиц в вертикальном трубопроводе и на взвешивание столба гидросмеси;  $\lambda$  — коэффициент гидравлического сопротивления;  $v_{см}$  — средняя скорость движения смеси;  $g$  — ускорение свободного падения;  $D$  — внутренний диаметр трубопровода;  $c_p$  — средняя рабочая концентрация твердых частиц в восходящем потоке гидросмеси;  $w$  — скорость свободного падения твердых частиц в воде.

Средняя скорость движения смеси:

$$v_{см} = \frac{4Q_{ТВ}}{\pi D^2 c_0 \rho_{ТВ}},$$

где  $Q_{ТВ}$  — производительность системы по горной массе;  $c_0$  — средняя исходная концентрация частиц твердого материала (горной массы);  $\rho_{ТВ}$  — плотность твердых частиц.

Средняя рабочая концентрация твердых частиц в восходящем потоке гидросмеси:

$$c_p = \frac{c_0 v_{см}}{v_0 - w'} = \frac{4Q_{ТВ}}{\pi D^2 \rho_{ТВ} (v_0 - w')},$$

где  $v_0$  — средняя скорость чистой воды;  $w'$  — средняя скорость стесненного падения твердых частиц в воде (гидравлическая крупность).

Скорость чистой воды определяется по формуле

$$v_0 = \frac{v_{см} + w'}{2} + \sqrt{\frac{(v_{см} + w')^2}{4} - v_{см} w' (1 - c_0)}.$$

Скорость стесненного падения твердых частиц:

$$w' = w(1 - c_0)^2 \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right).$$

Скорость свободного падения частиц в спокойной воде:

$$w = F \sqrt{dg \left(\frac{\rho_{ТВ}}{\rho_0} - 1\right)},$$

где  $F$  — коэффициент гидравлической крупности, определяемый по формуле

$$F = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\mu^2}{gd^3 \rho_0 (\rho_{ТВ} - \rho_0)}} - \sqrt{\frac{36\mu^2}{gd^3 \rho_0 (\rho_{ТВ} - \rho_0)}},$$

где  $\mu$  — динамический коэффициент вязкости морской воды;  $d$  — диаметр транспортируемых частиц;  $\rho_0$  — плотность морской воды.

Проведен расчет по определению глубины расположения буферной емкости при следующих данных:  $d = 0,05$  м;  $\mu = 1,673$  мПа · с;  $\rho_0 = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{ТВ} = 4500$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda = 0,015$ ;  $H_p = 4500$  м;  $h_{зп} = 2$  м;  $h_{мп} = 30$  м;  $K_c = 0,8$ ;  $c_0 = 0,1$ ;  $D = 0,3 \dots 0,5$  м;  $Q_{ТВ} = 10 \dots 410$  кг/с.

Для наглядности представим расчет с  $D = 0,4$  м и  $Q_{ТВ} = 130$  кг/с (468 т/ч):

$$F = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36 \cdot 1,673^2}{9,81 \cdot 0,05^3 \cdot 1000 \cdot (4500 - 1000)}} - \sqrt{\frac{36 \cdot 1,673^2}{9,81 \cdot 0,05^3 \cdot 1000 \cdot (4500 - 1000)}} = 0,678;$$

$$w = 0,6775 \sqrt{0,05 \cdot 9,81 \cdot \left(\frac{4500}{1000} - 1\right)} = 0,888 \text{ м/с};$$

$$w' = 0,888 \cdot (1 - 0,1)^2 \cdot \left(1 - \frac{0,05^2}{0,4^2}\right) = 0,708 \text{ м/с};$$

$$v_{см} = \sqrt{\frac{4 \cdot 130}{3,14 \cdot 0,4^2 \cdot 0,1 \cdot 4500}} = 2,3 \text{ м/с};$$

$$v_0 = \frac{2,3 + 0,708}{2} + \sqrt{\frac{(2,3 + 0,708)^2}{4} - 2,3 \cdot 0,708 \cdot (1 - 0,1)} = 2,396 \text{ м/с};$$

$$c_p = \frac{0,1 \cdot 2,3}{2,396 - 0,708} = \frac{4 \cdot 130}{3,14 \cdot 0,4^2 \cdot 4500 \cdot (2,396 - 0,708)} = 0,136;$$

$$i_r = \left\{ 0,015 \cdot \frac{2,3^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,4} \times \left[ 1 + 145 \cdot 0,136 \cdot \frac{9,81 \cdot 0,4}{2,3^2} \cdot \frac{0,888}{\sqrt{9,81 \cdot 0,4}} \right] \right\} = 0,76;$$

$$h_6 = \frac{0,76 \cdot (4500 - 2) \cdot 0,8 + 30}{0,76 \cdot 0,8 + 1} = 288 \text{ м}.$$

Проведены вычисления с диаметрами трубопровода 0,3; 0,4 и 0,5 м в диапазоне изменения производительности 10...410 кг/с. Скорость свободного падения частиц в спокойной воде для всех расчетов будет одинакова  $w = \text{const} = 0,888 \text{ м/с}$ , так как диаметр и плотность частиц для упрощения расчета приняты постоянными. Результаты расчетов приведены на рис. 2.

На графике хорошо просматривается зависимость глубины расположения БФ от производительности при различных диаметрах трубопровода. Наименьшие значения глубины выделены точками.

На рисунке видно, что при увеличении  $D$  уменьшается  $h_b$ . Это происходит из-за увеличения скорости стесненного падения твердых частиц. Чем больше скорость, тем меньше будут удельные потери напора, и как следствие, уменьшится глубина расположения БФ.

Для подробного анализа факторов, влияющих на глубину расположения буферной емкости, разберем графическую зависимость  $h_b$  от  $Q_{\text{ТВ}}$  при внутреннем диаметре трубопровода 0,4 м (рис. 3).

На графике можно выделить три характерные области. В первой области прослеживается обратная зависимость  $h_b$  от  $Q_{\text{ТВ}}$ , т. е. при увеличении производительности уменьшается глубина погружения буферной емкости. Это можно объяснить тем, что от производительности зависит скорость гидросмеси, которая, в свою очередь, влияет на скорость воды в трубопроводе. При уменьшении производительности скорость воды снижается. Чем больше она приближается к скорости стесненного падения твердых частиц, тем больше становится рабочая концентрация  $c_p$  в трубопроводе (рис. 4). Этот процесс характеризуется скольжением твердых частиц относительно потока чистой воды. Из-за увеличения концентрации  $c_p$  повышается масса гидросмеси. И как следствие, повышаются удельные потери, прямо влияющие на глубину погружения буферной емкости.

В третьей области (см. рис. 3) основное влияние на глубину погружения БФ оказывает увеличивающаяся скорость гидросмеси (см. рис. 4) при постепенном увеличении производительности. С увеличением скорости растут удельные потери в трубопроводе, так как они зависят от трения жидкой и твердой среды гидросмеси о стенки трубопровода. Для второй области (см. рис. 3) характерна наименьшая глубина расположения БФ. Это достигается посредством оптимального сочетания действительной концентрации твердого материала в трубопроводе и величины потерь на трение в системе.

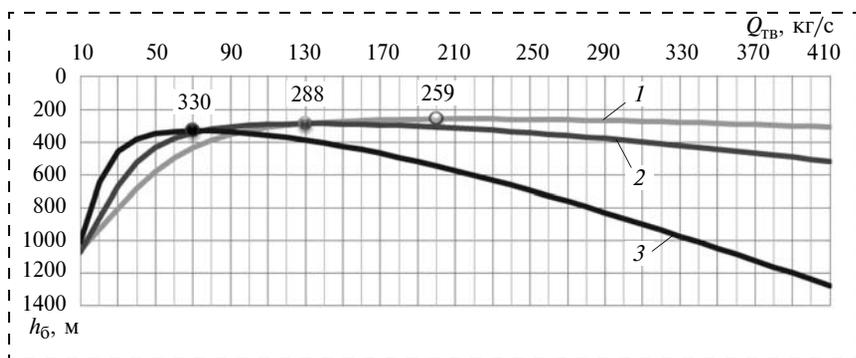


Рис. 2. График глубины расположения БФ при различных диаметрах трубопровода  $D$ : 1 — 0,5 м; 2 — 0,4 м; 3 — 0,3 м



Рис. 3. Зависимость  $h_b$  от  $Q_{\text{ТВ}}$  при диаметре трубопровода 0,4 м

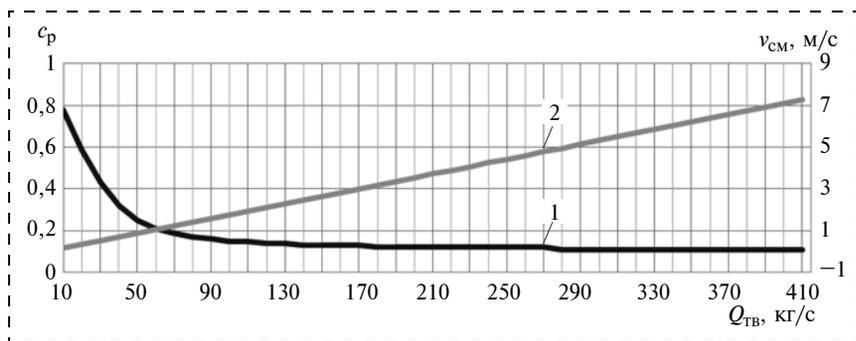


Рис. 4. Изменение рабочей концентрации твердого материала и скорости гидросмеси с увеличением производительности: 1 — рабочая концентрация; 2 — скорость гидросмеси

При проведении расчетов найдена минимальная глубина расположения буферной емкости при соответствующем диаметре трубопровода и производительности, а также выявлена закономерность при гидроподъеме твердых частиц, которые в дальнейшем повлияют на проектирование и создание системы по подводной добыче.

#### Список литературы

1. **Александров В. И., Собота Е.** Моделирование и расчет системы гидравлического подъема горной массы при подводной разработке минерального сырья // Записки Горного института. 2003. Т. 157. С. 140—143.
2. **Юфин А. П.** Гидромеханизация. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1974. 223 с.

**V. I. Aleksandrov**, Head of Chair, e-mail: alexvict@spmi.ru,  
**I. V. Egorov**, Graduate Student, e-mail: egorov\_iv@bk.ru,  
National Mineral Resources University (University of Mines), Saint Petersburg, Russia

## The Calculation of Buffer Vessel Immersion Depth in the Systems of Rock Mass Hydraulic Hoisting from the Seabed

*Nowadays there are no reliable and energy-efficient systems for the ferromanganese nodules development and transportation from the deep seas and oceans on the surface of the water. The most important aspects of the production module designing and developing is the definition of the buffer vessel lowest depth, which influences in the establishing and operating costs of the equipment since an increase in the depth increases the length of the pipeline, rigidly fixed to the mining vessel, increases the water pressure, which affects the design features and reliability of the equipment, and also influences in the costs of maintenance staff safety.*

**Keywords:** ferromanganese nodules, mining machine, buffer vessel, flexible pipeline, slurry, productivity, hydrostatical pressure, concentration

#### References

1. **Aleksandrov V. I., Sobota E.** Modelirovanie i raschet sistemy gidravlicheskogo pod#ema gornoj massy pri pod-

vodnoj razrabotke mineral'nogo syr'ja. *Zapiski Gornogo instituta*. 2003. V. 157. P. 140—143.

2. **Jufin A. P.** *Gidromehanizacija*. Izd. 2-e, pererab. i dop. M.: Strojizdat, 1974. 223 p.

## Информация

С 21 по 23 апреля 2015 г. в Москве, в МВЦ "Крокус Экспо" состоялась 19-я Международная выставка оборудования и технологий для добычи и обогащения полезных ископаемых MiningWorld Russia.

В выставке приняли участие 235 компаний из 27 стран мира. В числе участников выставки — ведущие компании отрасли. В этом году 32 % компаний-участников участвовали в выставке MiningWorld Russia впервые, что говорит о высоком доверии к выставке, как к эффективному маркетинговому инструменту развития бизнеса, в том числе в сложных экономических условиях.

В рамках выставки с успехом прошли три международные конференции: "Машины и оборудование для открытых горных работ", "Золото и технологии", "Технологии подземной разработки месторождений полезных ископаемых". В конференциях приняли участие более 400 делегатов, среди которых были представители предприятий горно-добывающей отрасли, машиностроительных заводов, научно-исследовательских организаций, коммерческих компаний, высших учебных заведений и профильных ассоциаций. Всего было сделано около 40 докладов.

**20-я Международная выставка технологий и оборудования для добычи и обогащения полезных ископаемых MiningWorld Russia состоится 26—28 апреля 2016 г. в Москве, МВЦ "Крокус Экспо".**

УДК 622.23

**А. Б. Жабин**, д-р техн. наук, проф., **Е. А. Аверин**, асп.,  
ТулГУ, г. Тула

E-mail: zhabin.tula@mail.ru; evgeniy.averin.90@mail.ru

## **Систематизация параметров процесса эрозии горных пород под действием гидроабразивных струй**

---

*Показаны и систематизированы на основе комплексных показателей параметры, определяющие процесс эрозии горных пород под действием гидроабразивных струй. Причем эрозия рассматривается как совокупность одновременно происходящих деформаций различного характера.*

**Ключевые слова:** гидроабразив, эрозия, горные породы, гидроструйные технологии, параметры, комплексные показатели

**В** связи со все бóльшим распространением гидроабразивной технологии в различных отраслях промышленности возникает потребность в обобщении имеющегося научного задела. Первичным в таком случае являются выявление и систематизация параметров, определяющих эффективность разрушения материалов этим способом. Первая из упомянутых задач успешно решена. Значительный объем проведенных экспериментальных исследований позволил однозначно установить если не все, то многие параметры способны оказывать влияние на протекание процесса разрушения [1]. В то же время существующие классификации параметров значительно отличаются, а должная систематизация отсутствует. Такая ситуация связана с тем, что, по нашему мнению, при этом не учитывается механизм разрушения в результате воздействия гидроабразивной струи и протекания всего процесса.

Разрушение материалов гидроабразивным способом происходит вследствие эрозии [2], возникающей как результат воздействия абразивных частиц на поверхность разрушаемого материала [3]. При этом характер воздействия во многом определяется типом разрушения материала: хрупкое или пластическое. В настоящее время возможно дать оценку конкретному материалу с точки зрения его отнесения к одной из двух указанных выше групп при конкретных условиях нагружения в заданных внешних условиях на атомном уровне [4]. Хрупкое разрушение возникает вследствие разрыва меж-

атомных связей, а пластическое — из-за смещения атомных слоев по плоскостям скольжения. Поэтому материалы с изотропными свойствами обычно демонстрируют хрупкое разрушение. Твердые тела с кристаллической структурой, в которых распространение трещины затруднено вследствие снятия локальных концентраций напряжения пластическими деформациями, характеризуются пластическим разрушением [4]. Большинство горных пород является хрупкими [2].

Известны примеры описания разрушения горных пород как процесса эрозии [5–9]. Однако они либо предназначены только для количественной оценки эффективности разрушения и потому не учитывают механизм эрозии, либо исходят из упрощенного предположения о квазистатическом характере протекания процесса, хотя известно, что эрозия при бомбардировке поверхности разрушаемого материала имеет динамический характер с одновременным протеканием процессов, имеющих различную природу [10].

В процессе контакта частиц, находящихся внутри гидроабразивной струи, с поверхностью преграды наблюдаются упругопластические деформации и растрескивание. В связи с этим в качестве физических свойств горных пород, определяющих процесс их эрозии, уместно использовать вязкоупругие и прочностные показатели. В качестве прочностного показателя на основании парного корреляционного анализа используемых критериев, оце-

нивающих сопротивляемость горных пород разрушению гидроабразивным инструментом, будем использовать одноосное сопротивление пород сжатию  $\sigma_{сж}$  [1, с. 85—88]. Полностью характеризуют упругие свойства изотропных материалов модуль Юнга  $E$  и коэффициент Пуассона  $\nu$ .

В качестве критериев оценки вязкости разрушения материала (трещиностойкости) наиболее часто используются критическое значение коэффициента интенсивности напряжений  $K_{IC}$  и  $J_C$  — критическое значение  $J$ -интеграла (интеграла Эшелби — Черепанова — Райса). Первый из указанных параметров характеризует статическую трещиностойкость разрушаемого материала [11, с. 6], а второй определяет момент начала динамического роста трещины [12, с. 14]. Этот параметр является константой и выражает количество энергии для увеличения площади поверхности трещины на единицу. Так как образование и рост трещин не начинаются сразу после приложения нагрузки, то для учета этого явления будем использовать критерий инкубационного времени хрупкого разрушения  $\tau$ . Он не зависит от конкретного закона нагружения и позволяет моделировать поведение разрушаемого материала в широком диапазоне изменения параметров внешнего воздействия [13].

Для абразивной частицы определяющим параметром является ее кинетическая энергия в момент удара, которая зависит, в первую очередь от ее скорости. Допустимо считать скорость частицы равной скорости гидроабразивной струи [1, 6, 8]; при этом скорость гидроабразивной струи в диапазоне рациональных значений отношения массового расхода абразива к массовому расходу воды определяется только скоростью струи воды без необходимости учитывать индивидуальные геометрические характеристики инструмента [9]. Скорость струи воды находится как отношение объемного расхода воды к площади поперечного сечения струеформирующей насадки [1, 9].

Таким образом, основными параметрами процесса гидроабразивного разрушения являются: объемный расход воды, скорость гидроабразивной струи, кинетическая энергия частицы (каждый из них описывается некоторыми величинами, которые будут рассмотрены ниже), а также физические свойства разрушаемого материала. С учетом изложенного выше факторы, определяющие процесс

гидроабразивного разрушения горных пород, можно разделить на четыре группы:

1. Физические свойства горных пород.
2. Режимные параметры процесса.
3. Конструктивные параметры оборудования для реализации технологии. При этом, как правило, ограничиваются геометрическими параметрами инструмента. И хотя они действительно играют главенствующую роль, но конструктивное оформление и схемы компоновки прочего оборудования могут оказывать значимое влияние.
4. Гидравлические параметры.

Часто вместо обобщенного параметра "физические свойства" используют более конкретные определения "упругие и прочностные свойства" или даже просто "прочностные". В целях недопущения разночтений и систематизации известных, а также еще не учитываемых по разным соображениям параметров, присущих горным породам и способных оказывать влияние на протекание процесса, предлагается использовать более общее и полное определение — "физические".

Комплексным показателем, характеризующим вторую группу факторов помимо упомянутых выше, можно считать энергию удара абразивной частицы в момент ее взаимодействия с разрушаемым материалом. На этот показатель оказывают влияние следующие параметры: скорость перемещения инструмента над поверхностью разрушаемого материала  $v_{п}$ , расстояние между срезом коллиматора  $l_0$ , а также угол резания (атаки)  $\varphi$ .

Комплексным показателем, характеризующим полностью третью группу факторов и частично четвертую, можно считать скорость  $v_a$  гидроабразивной струи непосредственно в момент ее выхода из инструмента.

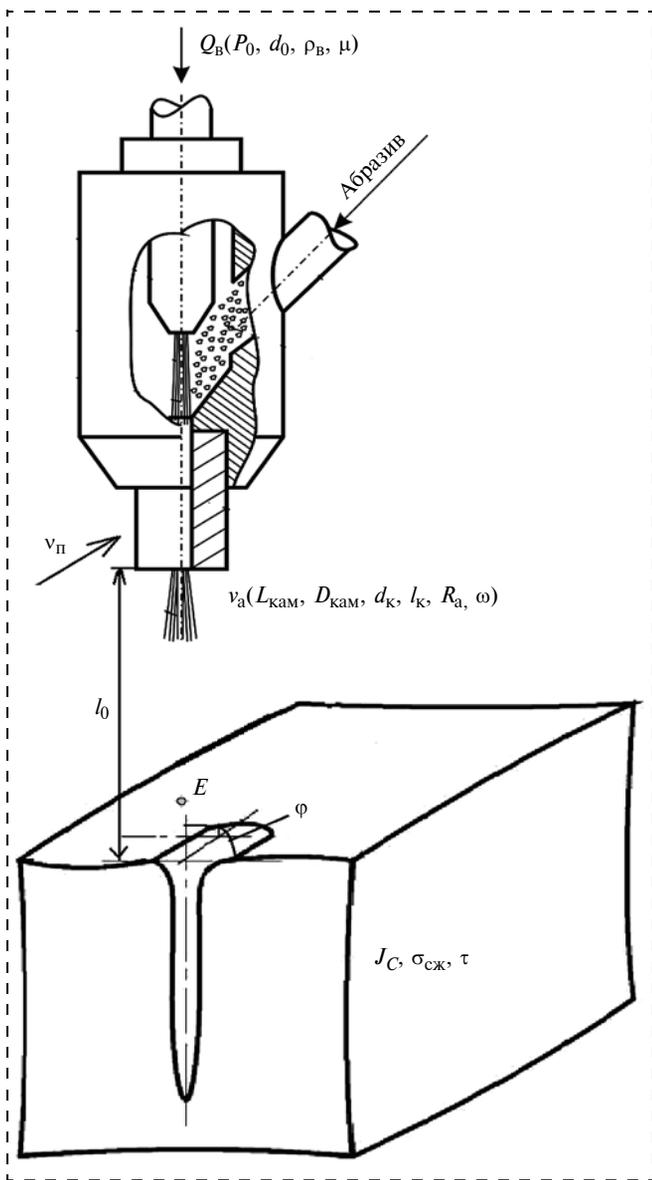
Наиболее существенными параметрами, оказывающими влияние на этот показатель, являются:

форма, размеры и масса абразивных частиц (режимные параметры);

диаметр отверстия  $d_k$  и длина  $l_k$  коллиматора, диаметр  $D_{кам}$  и длина  $L_{кам}$  камеры смешивания, радиус  $R_a$  и угол наклона  $\omega$  канала подвода абразива (геометрические параметры инструмента) [14];

конструктивные особенности и схемы компоновки прочего оборудования.

Комплексным показателем, характеризующим четвертую группу факторов, является объемный расход воды, определяемый давлением воды перед струеформирующей насадкой  $P_0$ , диаметром от-



Параметры, определяющие эрозионное разрушение горных пород под действием гидроабразивной струи

верстия струеформирующей насадки  $d_0$  (в качестве параметра, определяющего площадь сечения водяной струи), плотностью воды  $\rho_B$  и коэффициентом расхода струеформирующей насадки  $\mu$ , которые собственно и являются гидравлическими параметрами.

Упомянутые выше параметры систематизированы и обобщены на рисунке.

Полученный результат может быть использован при теоретических разработках, касающихся не только гидроабразивного резания, но и с учетом конкретных особенностей процессов гидроабразивных технологий в принципе.

1. Бреннер В. А., Жабин А. Б., Пушкарев А. Е., Щеголевский М. М. Гидроструйные технологии в промышленности. Гидроабразивное резание горных пород. М.: Изд-во МГГУ, 2003. 279 с.

2. Эрозия / Под ред. К. Прис. М.: Мир, 1982. 464 с.

3. Evans A. G. and Wilshaw T. R. Quasi-Static Solid Particle Damage in Brittle Solids-1. Observations, Analysis and Implications, Acta Metallurgica. 1976. Vol. 24. P. 939—956.

4. Евстифеев А. Д., Груздков А. А., Петров Ю. В. Температурно-скоростная зависимость типа разрушения // Журнал технической физики. 2013. Т. 83. Вып. 7. С. 59—63.

5. Жабин А. Б., Пушкарев А. Е., Головин К. А., Ерухимович Ю. Э. Моделирование процесса гидроабразивного резания горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 1999. № 8. С. 170—172.

6. Жабин А. Б., Лавит И. М., Поляков А. В. Механизм и закономерности процесса эрозионного разрушения горных пород под действием гидроабразивной струи // Горное оборудование и электромеханика. 2008. № 1. С. 37—41.

7. Аверин Е. А. Эрозия поверхности горных пород при одиночном ударе абразивной частицы с учетом образования лунки выкола // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. № 5. С. 193—200.

8. Жабин А. Б., Лавит И. М., Аверин Е. А. Математическая модель процесса эрозии горных пород гидроабразивной струей // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. № 11—2. С. 302—312.

9. Жабин А. Б., Аверин Е. А. Совершенствование метода расчета глубины резания материалов гидроабразивным инструментом // Горное оборудование и электромеханика. 2014. № 11. С. 24—29.

10. Petrov Y. V., Gruzdkov A. A., Morozov N. F. The principle of equal powers for multilevel fracture in continua // Doklady Physics. 2005. V. 50. № 9. P. 448—451.

11. Панасюк В. В. Механика квазихрупкого разрушения. Киев: Наук. думка, 1991. 416 с.

12. Черепанов Г. П. Механика разрушения композиционных материалов. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1983. 296 с.

13. Груздков А. А., Морозов Н. Ф., Петров Ю. В. Инкубационное время в задачах динамической прочности // Вестник Тамбовского университета. Сер.: Естественные и технические науки. 2010. Т. 15. № 3-1н. С. 792—793.

14. Мерзляков В. Г., Бафталовский В. Е. Установление рациональных параметров, разработка и создание инструментов для гидроабразивного резания твердых материалов // Горное оборудование и электромеханика. 2008. № 4. С. 27—31.

## Systematization of Parameter of Rocks Erosion Destruction with Abrasive Waterjet

*Parameters of rocks erosion destruction with abrasive waterjet are shown and systematized on the basis of complex indices. At this considering of erosion is as of deformations of various nature occurring simultaneously.*

**Keywords:** hydroabrasive, erosion, rocks, waterjet technologies, parameters, complex indices

### References

1. Brenner V. A., Zhabin A. B., Pushkarev A. E., Shhegovlevskij M. M. *Gidrostrujnye tehnologii v promyshlennosti. Gidroabrazivnoe rezanie gornyh porod.* M.: Izd-vo MG-GU, 2003. 279 p.

2. *Jerozija.* Pod red. K. Pris. M.: Mir, 1982. 464 p.

3. Evans A. G. and Wilshaw T. R. Quasi-Static Solid Particle Damage in Brittle Solids-1. *Observations, Analysis and Implications, Acta Metallurgica.* 1976. Vol. 24. P. 939–956.

4. Evstifeev A. D., Gruzdkov A. A., Petrov Ju. V. Temperaturno-skorostnaja zavisimost' tipa razrushenija. *Zhurnal tehnicheckoj fiziki.* 2013. T. 83. Vyp. 7. P. 59–63.

5. Zhabin A. B., Pushkarev A. E., Golovin K. A., Eruhovich Ju. Je. Modelirovanie processa gidroabrazivnogo rezanija gornyh porod. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheckij zhurnal).* 1999. N. 8. P. 170–172.

6. Zhabin A. B., Lavit I. M., Poljakov A. V. Mehanizm i zakonomernosti processa jerozionnogo razrushenija gornyh porod pod dejstviem gidroabrazivnoj strui. *Gornoe oborudovanie i jelektromehhanika.* 2008. N. 1. P. 37–41.

7. Averin E. A. Jerozija poverhnosti gornyh porod pri odnochnom udare abrazivnoj chasticy s uchedom obrazovanija lunki vykola. *Izvestija TulGU. Tehnicheckie nauki.* 2014. N. 5. P. 193–200.

8. Zhabin A. B., Lavit I. M., Averin E. A. Matematicheskaja model' processa jerozii gornyh porod gidroabrazivnoj struej. *Izvestija TulGU. Tehnicheckie nauki.* 2014. N. 11–2. P. 302–312.

9. Zhabin A. B., Averin E. A. Sovershenstvovanie metoda rascheta glubiny rezanija materialov gidroabrazivnym instrumentom. *Gornoe oborudovanie i jelektromehhanika.* 2014. N. 11. P. 24–29.

10. Petrov Y. V., Gruzdkov A. A., Morozov N. F. The principle of equal powers for multilevel fracture in continua. *Doklady Physics.* 2005. V. 50. N. 9. P. 448–451.

11. Panasjuk V. V. *Mehanika kvazihrupkogo razrushenija.* Kiev: Nauk. dumka, 1991. 416 p.

12. Cherepanov G. P. *Mehanika razrushenija kompozicionnyh materialov.* M.: Nauka, Glavnaja redakcija fiziko-matematicheskoi literatury, 1983. 296 p.

13. Gruzdkov A. A., Morozov N. F., Petrov Ju. V. Inkubacionnoe vremja v zadachah dinamicheskoi prochnosti. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Ser.: Estestvennye i tehnicheckie nauki.* 2010. T. 15. N. 3-1n. P. 792–793.

14. Merzljakov V. G., Baftalovskij V. E. Ustanovlenie racional'nyh parametrov, razrabotka i sozdanie instrumentov dlja gidroabrazivnogo rezanija tverdyh materialov. *Gornoe oborudovanie i jelektromehhanika.* 2008. N. 4. P. 27–31.

**Информация**

### ВНИМАНИЮ ПОДПИСЧИКОВ!

Продолжается подписка на журнал "Горное оборудование и электромеханика".  
Оформить подписку можно через подписные агентства или непосредственно в редакции.

Подписные индексы по каталогам: Роспечать — **20134**; Пресса России — **39708**.

Информация о журнале размещена на сайте <http://novtex.ru/gormash>

107076, Москва, Стромьинский пер., д. 4.

Тел. (499) 269-53-97. Тел./факс (499) 269-55-10.

E-mail: [gma@novtex.ru](mailto:gma@novtex.ru)

**И. И. Волошиновский, Л. Д. Певзнер**, д-р техн. наук, проф., зав. каф.,  
НИТУ "МИСиС", г. Москва

e-mail: lpevzner@msmu.ru

**Идея создания электропривода переменного тока  
для горных машин по В. С. Тулину  
(К 110-летию выдающегося электротехника —  
профессора Вячеслава Семеновича Тулина)**

---

**I. I. Voloshinovskiy, L. D. Pevzner**, Professor, Head of Chair,  
e-mail: lpevzner@msmu.ru, National University of Science and Technology MiSiS, Moscow, Russia

**Alternating Current Drive Idea for Mining Machinery  
with Invariant Control, According to Tulin V. S.  
(Devoted to Prof. Vyacheslav Semenovich Tulin 110<sup>th</sup> Anniversary)**

---

**В** горно-добывающей промышленности, особенно в угольных шахтах и разрезах, основным приводным электродвигателем добычных и транспортных машин является асинхронный двигатель



с короткозамкнутым ротором в рудничном взрывозащищенном исполнении.

Идея создания электропривода переменного тока, прежде всего на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, максимально приближенного по своим механическим и энергетическим характеристикам к электроприводу с двигателем постоянного тока параллельного возбуждения, неоднократно высказывалась профессором Вячеславом Семеновичем Тулиным и поддерживалась им в разработках молодых начинающих ученых в 1970—1980-е гг.

Начиная с 1960-х гг. в технологии подземной добычи угля произошел качественный скачок от широкозахватной выемки угля комбайнами с рабочим органом барного типа к узкозахватной — шнековой выработке угольного пласта. Этот факт привел к необходимости изменения электропривода рабочего органа угольного комбайна.

Действительно, для широкозахватного рабочего органа барного типа характерна тяжелая нагрузка в пусковых и стопорных режимах. Так, при завалах рабочего органа и ручной подаче на забой имели место частые разрывы барной цепи, что яв-

лялось серьезным аварийным отказом, который приводит к длительным простоям лавы.

Для узкозахватного рабочего органа шнекового типа характерна облегченная нагрузка в пусковых режимах, практически на холостом ходу, плавном забуривании в пласт, легком выходе из-под завала и номинальной нагрузке при равномерной подаче на забой. При ручной подаче шнека на забой с кнопочного пульта управления машинист комбайна переходит на форсированный режим работы, характеризуемый ударно-стопорными эффектами на валу, которые приводят к разрушительным перегрузкам трансмиссии и перегреву асинхронного с короткозамкнутым ротором электродвигателя.

Профессор В. С. Тулин по заданию Госстандарта СССР приступил к разработке технических требований на создание нового и модернизацию старого электрооборудования, в том числе в рудничном и взрывобезопасном исполнении. Модернизация и разработка нового электрооборудования горных машин, в первую очередь, касались асинхронных с короткозамкнутым ротором комбайновых электродвигателей.

Для узкозахватных шнеков в то время применялись асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором, разработанные по техническим требованиям для широкозахватных угольных комбайнов с глубокопазым или двухклеточным ротором. Эти электродвигатели имели значительный пусковой момент и повышенное скольжение в номинальном режиме, что приводило к преждевременному износу трансмиссии, поломке и стачиванию зубцов на шнеках и перегреву ротора. Так что вместо назначенного срока эксплуатации 8—12 лет электродвигатель работал не более полугода. Такое состояние электропривода не устраивало никого.

Профессор В. С. Тулин видел выход из этого состояния в необходимости автоматического регулирования усилия или скорости подачи на забой в зависимости от нагрузки на рабочем органе угольного комбайна, которое позволяло уменьшить влияние человеческого фактора на техническое состояние электрооборудования горных машин. Устранение машиниста комбайна из контура управления позволяло перейти к безлюдной выемки угля из очистного забоя.

Вячеслав Семенович первым сформулировал идею безлюдной выемки и много лет являлся активным пропагандистом различных вариантов ро-

ботизированной, безлюдной добычи угля, основу которой составляет взаимосвязанный электропривод резания и подачи узкозахватного рабочего органа комбайна, а также призабойного, лавного конвейера-перегрузателя угля на ленточный транспортер.

В 1960—1970-е гг. стремительно развивалась техника преобразования частоты и амплитуды напряжения и тока на основе силовых полупроводниковых приборов — тиристоров и транзисторов. Разработанные системы импульсно-фазового управления, обладающие достаточным быстродействием для регулирования не только механических, но и электромагнитных переменных режимов электродвигателя, позволили непосредственно управлять формированием крутящего момента через воздействия на токи в обмотках статора и ротора, а также потокоцеплением между ними путем формирования отрицательных обратных связей и реализации классических законов регулирования по отклонению.

Для шахтных механизмов со спокойной нагрузкой вентиляторного типа — насосов, компрессоров, воздуходувок для плавного пуска и регулирования частоты вращения по закону Костенко достаточно поддерживать на выходе преобразователя частоты пропорциональное соотношение между частотой и амплитудой напряжения, подаваемого на обмотку статора. В этом случае регулятор системы управления оказывается пропорциональным звеном с двумя выходами: один на задание частоты, а другой — на задание амплитуды напряжения, питающего обмотку статора. Система автоматического регулирования чаще выполнялась разомкнутой, реже замкнутой по скорости вращения, с прямым или косвенным ее измерением. Синтез и настройка регулятора таких систем сводятся к выбору крутизны механической характеристики в зависимости от инерционной массы на валу ротора.

Для электроприводов конвейеров и лебедок необходимо формировать тяговую характеристику, а для очистных и проходческих комбайнов, дробилок закладочных комплексов, имеющих ударно-стопорную нагрузку, — высокодинамичную механическую характеристику с возможностью работы на упор и стопорение. Та же проблема возникает в приводах малых внутришахтных подъемных машин, устанавливаемых в "слепых" стволах и на уклонах.

Формировать механические характеристики, способные обеспечить безударную отработку ударно-стопорной нагрузки, возможно приводами с электродвигателями постоянного тока, но на шахтах в те времена массово использовались нерегулируемые асинхронные двигатели и, как следствие, электроприводы массово выходили из строя задолго до назначенного срока эксплуатации. Так, комбайновые асинхронные двигатели с водяным охлаждением имели наработку на отказ менее одного года, примерно те же показатели надежности и у приводов скребковых конвейеров и перегружателей.

В 1980-х гг. была сделана очередная и последняя реальная попытка опытного применения электропривода постоянного тока для очистных угольных комплексов в Карагандинском филиале ИГД им А. А. Скочинского, возглавляемом профессором Э. Г. Краусом под идейным руководством профессора В. С. Тулина, при непосредственном участии группы от Московского горного института.

Экспериментальный очистной угольный комплекс с приводами резания и подачи был собран на базе электровозных тяговых электродвигателей постоянного тока с комбинированным последовательно-параллельным возбуждением. После натуральных испытаний на углецементных блоках комплекс был доставлен в шахту для опытной эксплуатации в реальных условиях.

Результаты этого эксперимента, опубликованные в открытой печати, были признаны положительными, однако последующего применения такой электропривод не получил по причине наличия коллектора и других причин, связанных с тиристорными преобразователями.

Параллельно решалась задача разработки электропривода на базе асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором и статическим преобразователем частоты, для которого неопределенным оставался выбор структуры регулятора системы автоматического управления. Вячеслав Семенович Тулин, ранее работая в НИИ "Электропривод" в должности главного инженера, являлся одним из руководителей создания для электроприводов постоянного тока универсальной блочной системы регуляторов (УБСР), которые предполагалось использовать в системах подчиненного регулирования. В этих системах осуществлялась последовательная коррекция параметров

путем компенсации "больших" постоянных времени до уровня "малых", соизмеримых с временем формирования электромагнитных процессов в замкнутых контурах по критерию "технического оптимума", а в контуре регулирования скорости — по критерию "симметричного оптимума".

Системы подчиненного регулирования нашли широкое применение для электроприводов постоянного тока, однако не для электроприводов переменного тока, которые оказались функционально более сложными многомерными с перекрестными связями объектами управления.

В иностранных источниках управляемые системы электроприводов переменного тока представлялись двумя группами: частотно-токовые, с управлением по частоте и амплитуде без коррекции по фазе напряжения и тока и векторные с управлением по частоте, амплитуде и коррекции по фазе напряжения и тока. Векторные системы под общим названием "Трансвектор" с вращением и колебанием векторов напряжения и тока с фазовой ориентацией системы координат по управляемому вектору позволяли осуществлять "условную компенсацию" одной из проекций управляемого вектора, вторая проекция которого совпадала с модулем вектора, поскольку в случае нарушения компенсации условия ориентации нарушаются с возникновением негативных последствий. Эти системы так и не нашли промышленного внедрения, поскольку результаты, получаемые на математических моделях объектов, заведомо аналитически ориентированы по одному из векторов режима.

В. С. Тулин не только отметил некорректность исследований и результатов моделирования, но и указал, как надо формировать модель структуры электродвигателя с неориентированными по системам координат векторами, которые могут быть неподвижными или вращающимися, колебаниями или без них. Далее предлагалось выполнить условия ориентации в одной из систем координат и затем осуществить компенсацию больших постоянных времени методами подчиненного регулирования, успешно применяемых в электроприводах постоянного тока. Тем не менее, на осциллограммах моделирования можно было видеть, как под действием возмущающего воздействия за счет перекрестных связей нарушаются ориентация векторов, условия компенсации больших постоянных времени объекта управления и, как следствие, нарушаются условия оптимумов переходных

процессов. Эти недостатки явились причинами того, что эти системы электроприводов не нашли применения.

Для автоматизированных приводов очистных угольных комплексов нужны электроприводы, свободные от указанных недостатков, электроприводы на основе асинхронных электродвигателей, не имеющих искрящих контактов ни на статоре, ни на роторе.

В. С. Тулин, энциклопедически владея информацией исследований по созданию новых электроприводов, поддержал исследования профессоров М. М. Ботвинника и Ю. Г. Шакаряна, предложивших структуру электропривода двойного питания на основе электрических машин переменного тока и прежде всего асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, не имеющих искрящих контактов ни на статоре, ни на роторе. Вячеслав Семенович увидел перспективность этих исследований для создания автоматизированного электропривода горных машин, используемых при безлюдной выемке угля из подземных очистных забоев.

Проблема создания требуемого электропривода сводилась к синтезу замкнутой системы автоматического управления инвариантной к возмущениям, которая обеспечивает автономность и заданное качество переходных процессов применительно к электрическим машинам, как объектам регулирования. М. М. Ботвинник и Ю. Г. Шакарян адаптировали теорию инвариантного управления, сформулированную профессором Г. В. Щипановым и обоснованную академиком Н. Н. Лу-

зиным применительно к электрическим машинам переменного тока.

Московским горным институтом и НПО "Электропривод" под руководством профессора Вячеслава Семеновича Тулина в конце прошлого столетия были запатентованы более десяти технических решений способов управления и устройств для их осуществления применительно к электроприводам переменного тока, ориентированных на использование для горных машин. Тем не менее производственной реализации эти технические решения не получили в силу того, что алгоритмы управления этих систем, ориентированные на цифровую реализацию, требовали значительных вычислительных возможностей промышленных бортовых контроллеров и специфического интерфейса, которых в то время не было.

Сегодня, когда существуют линейки промышленных контроллеров и аппаратного интерфейса, развиты операционные системы, позволяющие создавать микропроцессорные вычислительные средства со сколь угодно сложными алгоритмами, использование теории инвариантного управления для создания автоматизированного электропривода переменного тока для горных машин вполне реально.

Будем надеяться, что придут молодые, подающие надежды студенты и аспиранты, способные проникнуться учением инвариантного управления, признанным и официально зарегистрированным как научное открытие, и реализуют то значительное направление, которое не успел завершить профессор Вячеслав Семенович Тулин.

---

---

ООО "Издательство "Новые технологии", 107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Технический редактор *Е.В. Конова*. Корректор *З.В. Наумова*.

Сдано в набор 09.04.2015. Подписано в печать 28.05.2015. Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Заказ ГО415. Цена свободная.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-19854 от 15 апреля 2005 г.

Оригинал-макет ООО "Авансд солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансд солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: [www.aov.ru](http://www.aov.ru)