

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:**

ДАНИЛИНА И.С.

ПЯТОВА И.Ю.

**Телефон редакции:**

(499) 269-53-97

**Факс:** (499) 269-55-10

**Email:** gma@novtex.ru

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### ПОДЗЕМНЫЕ РАБОТЫ

**Сергеев В. В., Версилов С. О.** Адаптивные передвижные питатели пассивного действия . . . . . 3

### ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. АВТОМАТИЗАЦИЯ

**Сажин Р. А.** Алгоритм автоматизированного управления шахтной водоотливной установкой . . . . . 7

**Абрамович Б. Н., Сычев Ю. А., Фёдоров А. В.** Многоступенчатая система автоматического ввода резерва на основе источников бесперебойного питания в системах электроснабжения объектов горных предприятий . . . . . 17

### СТАЦИОНАРНЫЕ УСТАНОВКИ

**Трифанов Г. Д., Зверев В. Ю., Стрелков М. А.** Экспериментальные исследования влияния режима работы шахтных подъемных установок на динамические нагрузки в канате . . . . . 21

### РЕМОНТ. НАДЕЖНОСТЬ. ДОЛГОВЕЧНОСТЬ

**Сергеев В. Ю.** Технология и экономика сервисного обслуживания как части стоимости владения горного оборудования . . . . . 26

**Коротков В. А.** Сокращение частоты ремонтов и ремонтных затрат применением плазменной закалки и карбонитрации . . . . . 30

### НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ И КОНСТРУКТОРСКИЕ РАЗРАБОТКИ

**Сысоев Н. И., Буренков Н. Н., Чу Ким Хунг.** Выбор рациональных параметров режущей части буровых резцов с помощью метода конечных элементов . . . 34

**Шемякин С. А., Чебан А. Ю.** Определение сопротивления резанию мерзлых пород глубокооблокированным (щелевым) способом . . . . . 39

**Хальфин М. Н., Аль-Джумаили А. Х.** Влияние температурных напряжений на величину допустимого радиуса волнистости шахтного подъемного каната . . . . . 44

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора 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:**

KOZOVOY 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:**

DANILINA I.S.

PYATOVA I.Yu.

### CONTENTS

#### UNDERGROUND MINING

**Sergeev V. V., Versilov S. O.** Adaptive Removable Feeders of Passive Action . . . . 3

#### ELECTROMECHANICS. AUTOMATION

**Sazhin R. A.** The Algorithm of Automated Management of the Mine Dewatering Installation . . . . . 7

**Abramovich B. N., Sychev Yu. A., Fedorov A. V.** Multistage Automatic Transfer Switch System in Power Supply Systems of Mining Enterprises Objects on the Basis of Uninterruptible Power Supplies . . . . . 17

#### STATIONARY INSTALLATIONS

**Trifanov G. D., Zverev V. Yu., Strelkov M. A.** The Experimental Research of Mining Hoist Plant Operation Mode Influence on Dynamic Loads in the Wire Rope . . . . 21

#### REPAIR. RELIABILITY. DURABILITY

**Sergeev V. Yu.** Technology and Economy of Service as Part of the Cost of Ownership of Mining Equipment . . . . . 26

**Korotkov V. A.** Reduce the Frequency of Repairs and Maintenance Costs Application of Plasma Quenching and Carbonitriding . . . . . 30

#### SCIENTIFIC RESEARCH AND DEVELOPMENT

**Sysoev N. I., Burenkov N. N., Chu Kim Hung.** Choice of the Rational Parameters of Cutting Part Drilling Tools with Using the Finite Element Method . . . . . 34

**Shemyakin S. A., Cheban A. Yu.** Determination of Resistance to Cutting of Frozen Rocks Deeply Blocked (Slot) . . . . . 39

**Khal'fin M. N., Al'-Jumali A. Kh.** Effect Thermal Stresses on the Value of Allowable Radius Waviness of Mine Hoisting Rope . . . . . 44

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

УДК 622

**В. В. Сергеев**, д-р техн. наук, проф., СКГМИ (ГТУ), г. Владикавказ,  
**С. О. Версилов**, ЮРГПУ (НПИ) им. М. И. Платова, г. Новочеркасск

E-mail: vv\_sergeev\_47@mail.ru; versilov@bk.ru

## Адаптивные передвижные питатели пассивного действия

---

*Предложен рациональный путь повышения эффективности и безопасности отработки месторождений твердых полезных ископаемых при подземной добыче на больших глубинах: применение вариантов систем разработки с обрушением и выпуском руды под налегающими породами на основе принципиально новых технических устройств с возможностью их максимальной адаптации к горно-геологическим условиям отработки при одновременном существенном снижении трудоемкости монтажа и транспортировки узлов и деталей конструкций.*

*Разработана новая конструкция передвижного питателя пассивного действия, который можно изготовить в подземных условиях с учетом реальных горно-технических условий.*

**Ключевые слова:** месторождения твердых полезных ископаемых, разработка месторождений на больших глубинах, система разработки с обрушением, выпуск руды, выпускное устройство, адаптация выпускного устройства к горно-геологическим условиям отработки

На сегодняшний день успешное внедрение технологии выемки рудных запасов в сложных горно-технических условиях невозможно без создания принципиально новых технических устройств с возможностью максимальной адаптации к горно-геологическим условиям отработки при одновременном снижении трудоемкости монтажа и транспортировки узлов и деталей конструкций.

Известны [1] два типа адаптивных (т. е. изготавливаемых на месте применения из подручных материалов, приспособленных к конкретному месту использования) питателей: активного [2, 3] и пассивного [4–8] действия.

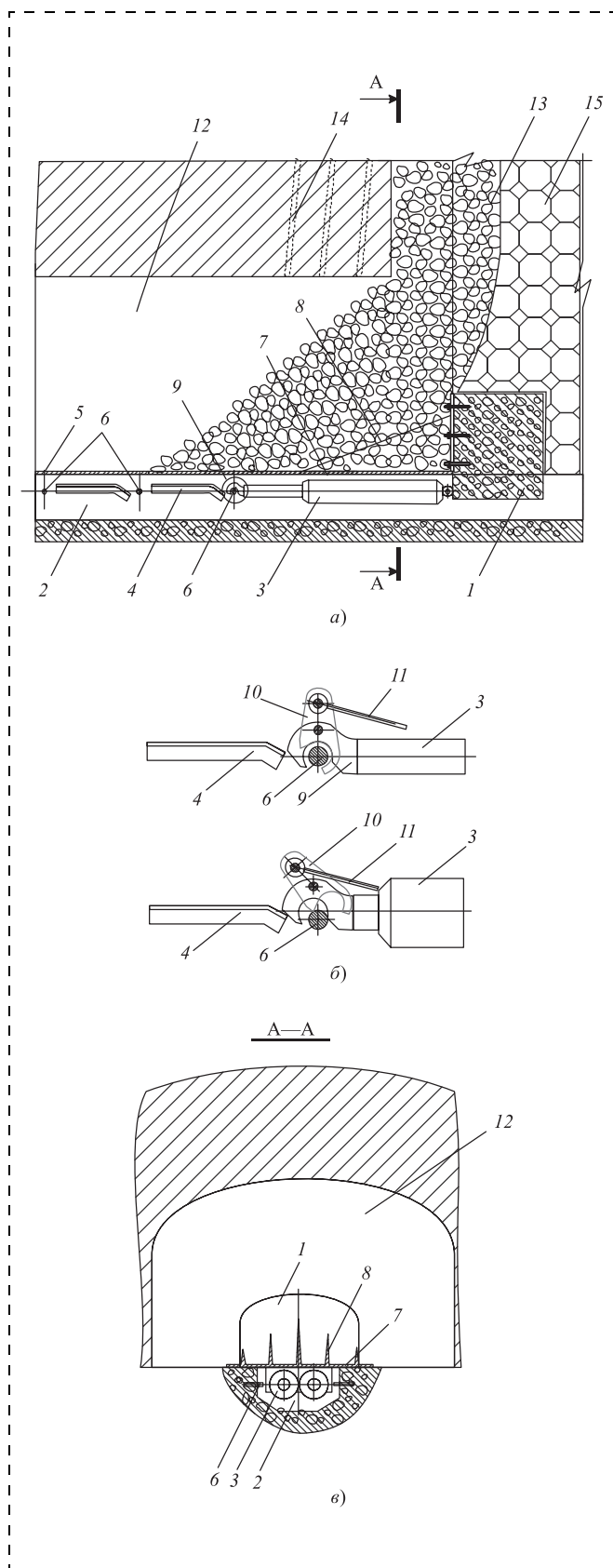
Основная область применения питателей активного действия — выпуск руды из выпускных отверстий (дучек, рудоспусков и т. д.) постоянного сечения.

Основная область применения питателей пассивного действия — выпуск руды из панелей блоков с торцовым выпуском руды с обрушением руды и налегающих пород. Эффективность применения таких питателей в указанных условиях достигается тем, что они обеспечивают возможность регулировать размер выпускного отверстия. Это влечет изменение размеров фигуры выпуска, что в свою очередь обеспечивает сортировку руды и породы на стадии выпуска.

На основе анализа опыта эксплуатации различных выпускных устройств можно утверждать, что в наибольшей степени горно-геологическим условиям отработки рудных залежей на больших глубинах будет соответствовать такой передвижной питатель пассивного действия, который можно было бы изготовить в подземных условиях с учетом реальных горно-технических условий и конструкция которого позволила бы максимально просто и надежно осуществить дистанционное управление таким техническим устройством.

Основная идея такого решения проблемы — изготовление грузонесущих конструкций непосредственно в забое (в буродоставочной выработке на месте отбойки первого рудного слоя после проходки в торцовом забое отрезного восстающего), что позволит интенсифицировать процесс выпуска руды за счет сокращения времени на подготовительно-заключительные операции. В целом технология изготовления такого адаптивного питателя может быть следующей.

Устройство для выпуска руды состоит из рабочего органа 1 (рис. 1), канала 2 с установленным в нем, по крайней мере, одним гидроцилиндром 3, направляющих 4, установленных параллельно каналу 2, разборного перекрытия 5 и фиксаторов 6 положения гидроцилиндра 3. Гидроцилиндр 3



**Рис. 1. Железобетонный питатель пассивного действия для выпуска руды:**  
 а — положение питателя в буродоставочной выработке; б — положение штока гидроцилиндра (верхнее — рабочее, нижнее — при холостом ходе); в — сечение А-А буродоставочной выработки с питателем

соединен с рабочим органом 1. Фиксаторы 6 выполнены в виде стержней, закрепленных по обеим сторонам канала 2, и установлены на расстоянии, равном длине рабочего хода штока гидроцилиндра 3. Рабочий орган 1 снабжен настилом 7 с ребрами жесткости 8. Направляющие 4 имеют изогнутую форму и расположены между фиксаторами 6 с шагом друг от друга, равном длине рабочего хода штока гидроцилиндра 3. При этом на конце штока гидроцилиндра 3 расположен крюкообразный механизм 9, имеющий возможность зацепления его на фиксаторах 6. Механизм 9 снабжен стопорным устройством, выполненным в виде защелки 10 и толкателя 11 (см. рис. 1, б).

Устройство установлено непосредственно в буродоставочной выработке 12 для выгрузки руды 13 путем взрывания скважин 14, вблизи которых расположена и пустая порода 15.

Перед началом работы устройства производят его монтаж следующим образом. Непосредственно в буродоставочной выработке 12 изготавливают первоначально канал 2 путем заливки опалубок твердеющей смесью, например, бетоном или искусственным камнем. Одновременно в канале 2 монтируют фиксаторы 6 и закрепляют направляющие 4. После затвердения бетона подобным образом над каналом 2 изготавливают рабочий орган 1. Далее в канал 2 укладывают гидроцилиндр 3, соединяя его с первым фиксатором 6, рабочим органом 1 и маслостанцией (на рис. 1 не показана). При этом первоначально шток гидроцилиндра 3 должен быть максимально выдвинут и закреплен на фиксаторе 6 с помощью стопорного устройства. После этого канал 2 накрывают разборным перекрытием 5, которое служит для предотвращения попадания отбитой руды в канал 2 размещения гидроцилиндров 3. Для упрощения перемещения рабочего органа под отбойку очередного слоя руды разборное перекрытие 5 должно иметь ширину плит, равную длине рабочего хода штока гидроцилиндра 3. Настил 7 устанавливают над каналом 2 рядом с разборным перекрытием 5 и соединяют его с рабочим органом 1 ребрами жесткости 8. Устройство готово к работе. После изготовления над устройством отбивают слой руды 13 путем взрывания скважин 14.

Устройство работает следующим образом. При подаче масла в гидроцилиндр 3 рабочему органу 1 сообщается возвратно-поступательное движение. При прямом ходе рабочий орган 1 передней частью

перемещает отбитую руду 13 в буродоставочную выработку 12, а при обратном ходе происходит разрыхление отбитой руды 13 и ее выпуск на настил 7 и разборное перекрытие 5. Выпуск руды 13 заканчивается, когда гидроцилиндр 3 полностью выбрал свой ход и его шток максимально зашел в корпус. Затем гидроцилиндр 3 своим корпусом нажимает на толкатель 11, который отодвигает защелку 10, и крюкообразный механизм 9 штока гидроцилиндра 3 выходит из зацепления с фиксатором 6. При подаче масла в гидроцилиндр 3 его шток выдвигается и перемещается по направляющим 4 к следующему фиксатору 6. Гидроцилиндр 3 принимает новое стационарное положение. Далее отбивают следующий слой руды 13 и работа устройства продолжается.

Впервые адаптивный питатель из железобетона был разработан, как нами уже отмечалось [3], д-ром техн. наук В. В. Сергеевым (СКГТУ) и д-ром техн. наук С. О. Версиловым (ЮРГТУ) и др. [4–6], далее С. О. Версиловым он был изготовлен и испытан в промышленных условиях Урупского рудника Урупского ГОКа [8]. Этот питатель имел собственный корпус с нишей, в которой размещались гидроцилиндры, связанные с рабочим органом и имеющие перекрытие над рабочим органом. Движением рабочего органа вперед обеспечивалось регулирование выпускного отверстия, проталкивание негабаритов в выработку и руды, а движением назад — передвижение всего питателя в выработку из-под навала руды путем опоры на породу

за питателем. Испытания этого питателя показали работоспособность идеи, а также выявили ряд недостатков.

Результатом анализа недостатков, их учета и обработки явилась модернизация питателя, конструкция которого описана в настоящей статье. Описываемая конструкция полностью исключает заклинивание питателя в выработке благодаря наличию направляющего канала, более управляема, так как выдвигание питателя из-под навала не связано с состоянием (плотностью) породы за питателем. Конструкция питателя стала проще и менее материалоемкой, а работа — надежней. Внешний вид питателя в подземных условиях Урупского рудника приведен на рис. 2.

Экономический эффект, кроме снижения потерь и разубоживания, может быть получен и за счет существенного снижения затрат на проходку выработок вследствие уменьшения их сечения, так как габаритные размеры доставляемых в забой деталей адаптивных питателей будут значительно меньше применяемых в настоящее время конструкций из металла (в том числе узлов самоходного оборудования).

Низкая стоимость изготовления и монтажа адаптивных питателей позволит снизить время их использования. Срок службы таких выпускных устройств будет ограничен временем отработки одной панели. После ее отработки необходимо будет демонтировать оборудование привода питателя (гидроцилиндры) и изготовить основание пи-

тателя в новой панели с учетом физико-механических свойств нового обрабатываемого участка. Снижение срока использования питателя повысит надежность его работы. Возрастет вероятность безотказной работы питателя, что в целом будет способствовать повышению эффективности системы разработки за счет снижения времени простоев и затрат на ликвидацию последствий аварийных ситуаций. На сегодняшний день коллективом исследователей институтов ЮРГТУ (НПИ) (Новочеркасск), СКГМИ (ГТУ) (Владикавказ) и ОАО "Урал-



Рис. 2. Внешний вид первого адаптивного железобетонного питателя в шахте

механообр" (Екатеринбург) созданы и защищены патентами эффективные конструкции адаптивных питателей, применение которых позволит эффективно обрабатывать рудные залежи в сложных горно-геологических условиях.

#### Список литературы

1. **Сергеев В. В.** Классификация питателей для выпуска сыпучих материалов // Горное оборудование и электромеханика. 2014. № 6. С. 21—27.
2. **Пат. РФ 2539049.** Устройство для выпуска руды / Сергеев В. В., Версиров С. О.; опубл. 2014.
3. **Сергеев В. В., Версиров С. О.** О перспективах применения и совершенствовании адаптивных питателей

для выпуска руды // Горное оборудование и электромеханика. 2015. № 2. С. 3—6.

4. **А. с. 1559160 (СССР).** Устройство для выпуска руды / В. А. Шестаков, В. В. Сергеев, С. О. Версиров и др.; опубл. 1990, Бюл. № 15.
5. **А. с. 1754908 (СССР).** Устройство для торцового выпуска руды / В. А. Шестаков, В. В. Сергеев, С. О. Версиров и др.; опубл. 1992, Бюл. № 30.
6. **Пат. РФ 2341434.** Питатель для выпуска руды / Версиров С. О., Сергеев В. В., Игнатов М. В., Ефимов А. Р.; опубл. 2008, Бюл. № 35.
7. **Пат. РФ 2539453.** Устройство для выпуска руды / Сергеев В. В., Версиров С. О.; опубл. 2014.
8. **Версиров С. О.** Обоснование рациональных технологий с обрушением для комплексного использования запасов наклонных рудных залежей: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Новочеркасск, 1996.

**V. V. Sergeev**, Professor, e-mail: vv\_sergeev\_47@mail.ru,  
North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz,  
**S. O. Versilov**, e-mail: versilov@bk.ru, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),  
Novocherchassk, Russia

## Adaptive Removable Feeders of Passive Action

*A rational way of the expensive and safety in crease for the solid minerals working out during the underground output on the depths was suggested including the system processing variations use with ore caving and output under the suspended rocks using principally new technical appliances adapted to the mining-geological conditions simultaneously reducing the assembly, knots transportation and a new construction details labor capacity.*

*A new construction of the removable feeder of passive action which can be manufactured underground in terms of the real mining conditions was designed key words solid mineral deposits, big depth, caving, ore output, outlet device.*

**Keywords:** solid mineral deposits, great depths, caving, ore output, output knot

#### References

1. **Sergeev V. V.** *Klassifikatsia pitatelei dlya vypuska sypu-chikh materialov, Gornoe Oborudovanie i Elektrotmechanica*, Moscow, 2014, no. 6, pp. 21—27 (in Russian).
2. **Pat. RF 2539049.** *Ustroistvo dlya vypuska rudy.* Sergeev V. V., Versilov S. O. 2014.
3. **Sergeev V. V., Versilov S. O.** *O perspektivah primeneniya i sovershenstvovaniy adaptivnykh pitatelej dlya vypuska rudy, Gornoe Oborudovanie i Elektrotmechanica*, Moscow, 2015, no. 2, pp. 3—6 (in Russian).
4. **A. s. 1559160 (SSSR)** *Ustroistvo dlya vypuska rudy.* V. A. Shestakov, V. V. Sergeev, S. O. Versilov. 1990, no. 15 (in Russian).

5. **A. s. 1754908 (SSSR)** *Ustroistvo dlya tortsovogo vypuska rudy.* V. A. Shestakov, V. V. Sergeev, S. O. Versilov. 1992, no. 30 (in Russian).
6. **Pat. RF 2341434.** *Pitateľ dlya vypuska rudy.* Versilov S. O., Sergeev V. V., Ignatov M. V., Efimov A. R., 2008, no. 35 (in Russian).
7. **Pat. RF 2539453.** *Ustroistvo dlya vypuska rudy.* Sergeev V. V., Versilov S. O., 2014 (in Russian).
8. **Versilov S. O.** *Obosnovanie ratsionalnykh tekhnologiy s obrusheniem dlya kompleksnogo ispolzovania zapasov naklonnykh rudnykh zalezhei.* Avtoref. dis. ... d-ra techn. nauk, Novocherchassk, 1996 (in Russian).

УДК 005.92

Р. А. Сажин, канд. техн. наук, проф., ПНИПУ, г. Пермь

E-mail: eagp@mail.ru

## Алгоритм автоматизированного управления шахтной водоотливной установкой

---

*Рассмотрены вопросы основных требований к системам автоматизации шахтного водоотлива, на основе которых был определен алгоритм работы этого водоотлива в автоматизированном режиме. В том числе и подпрограммы, входящие в этот алгоритм.*

**Ключевые слова:** система автоматизации, алгоритм, программа, шахтная водоотливная установка

Подземные шахтные выработки, как правило, находятся ниже водонесущих пластов, из которых вода попадает в эти выработки, после чего по шпуровым канавам стекает в шахтный водосборник. Емкость этого водосборника выбирается из расчета максимального суточного водопритока при самых неблагоприятных условиях по обводненности шахты. Шахтные водоотливные установки должны откачать суточный водоприток за 3 ч своей непрерывной работы в ночное время, когда тариф на электроэнергию минимален.

Аппаратура автоматизации шахтного водоотлива должна обеспечивать:

1. Автоматическую контролируемую заливку насосов перед запуском их в работу.

2. Автоматическое включение в работу насосов рабочей группы при достижении верхнего уровня воды в водосборнике и непрерывную их работу до тех пор, пока уровень воды в водосборнике не снизится до нижней отметки.

3. Автоматический контроль за работающими насосами и аварийное отключение одного из них, в случае если он не достиг заданной производительности или при возникновении отказа в его работе (перегрев подшипников, короткое замыкание в приводе и т. д.).

4. Автоматическое включение в работу резервного насоса при отказе насоса основной группы или при недостаточной его производительности (когда уровень воды в водосборнике растет и достигает повышенной или аварийной отметки).

5. Автоматическое управление работой задвижек на трубопроводах.

Системы автоматической откачки воды из шахт и рудников повсеместно успешно работают уже в течение многих лет. Эти системы полностью удовлетворяют вышеописанным требованиям, но по принципу работы они относятся к аналоговому типу, а поэтому не могут быть встроены в системы автоматизированного управления современных горно-добывающих предприятий. Такие системы кроме непосредственного автоматического управления технологическим оборудованием обеспечивают постоянный контроль за его работоспособностью и в случае появления аварийных ситуаций позволяют точно определить место их возникновения.

Известно, что автоматизированные системы управления (в том числе и системы управления шахтным водоотливом) могут быть построены только на основе цифровых микропроцессорных устройств, основу которых составляют современные контроллеры. Как управляющие устройства эти контроллеры работают на основе программ, написанных на алгоритмическом языке по соответствующим алгоритмам. При переводе систем шахтного водоотлива на микропроцессорный вариант управления возникает необходимость в составлении такого алгоритма. Принципам построения этого алгоритма посвящена настоящая работа.

Схема установки элементов автоматики на водоотливной установке показана на рис. 1. В состав этой установки кроме насосов рабочей группы должны быть включены резервные насосы, вступающие в работу при отказе одного из насосов рабочей группы.

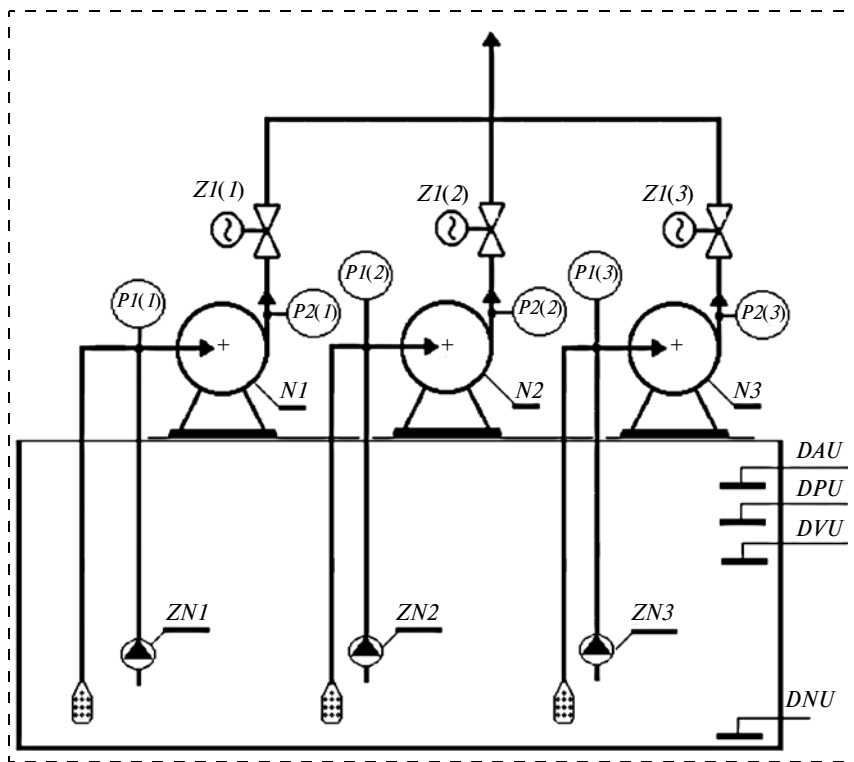


Рис. 1. Схема установки элементов автоматики для шахтного водоотлива

Алгоритм автоматизированного управления шахтным водоотливом разработан для варианта с тремя насосами. Один из этих насосов включается в работу при срабатывании датчика верхнего уровня. При этом два других насоса находятся в резерве. Второй насос дополнительно включается в работу только в том случае, если вода в водосборнике достигнет уровня повышенной отметки. При этом третий насос остается в резерве. Он вступает в работу только тогда, когда срабатывает датчик уровня аварийной отметки.

Для получения информации об уровне воды в водосборнике и состоянии водоотливной установки она должна быть укомплектована следующими датчиками:

$ZN1, ZN2, ZN3$  — датчики контроля состояния заливочных насосов;

$ZI(1), ZI(2), ZI(3)$  — датчики контроля состояния задвижек;

$DAU$  — датчик контроля аварийного уровня воды в водосборнике;

$DPU$  — датчик контроля повышенного уровня воды в водосборнике;

$DVU$  — датчик контроля верхнего уровня воды в водосборнике;

$DNU$  — датчик контроля нижнего уровня воды в водосборнике;

$DN1, DN2, DN3$  — датчики контроля состояния рабочих насосов.

Все представленные датчики формируют дискретный сигнал, который может принимать значение 0 или 1;

$PI(1), PI(2), PI(3)$  — датчики контроля давления на входе насосов;

$P2(1), P2(2), P2(3)$  — датчики контроля давления на выходе насосов.

Эти датчики формируют аналоговый сигнал.

Для выполнения операций управления шахтным водоотливом в алгоритм вводим следующие переменные:

$T1$  — время контроля работы заливочных насосов (тип — вещественный);

$T2$  — время контроля запуска в работу рабочих насосов (тип — вещественный);

$VU, PU, AU$  — параметры контроля состояния датчиков уровня (значение 0; 1);

$AR1, AR2, AR3$  — параметры контроля аварийного режима работы насосной установки (значение 0; 1);

$KPI(1), KPI(2), KPI(3)$  — параметры контроля давления на входе насосов (значение 0; 1);

$KP2(1), KP2(2), KP2(3)$  — параметры контроля давления на выходе насосов (значение 0; 1);

$KZN1, KZN2, KZN3$  — параметры контроля состояния заливочных насосов (значение 0; 1; 2);

$KZI(1), KZI(2), KZI(3)$  — параметры контроля состояния задвижек (значение 0; 1; 2);

$N1, N2, N3$  — параметры контроля состояния технологических линий откачки воды (значение 0; 1; 2).

Общая структура алгоритма автоматизированного управления шахтным водоотливом представлена на рис. 2.

После запуска этого алгоритма вводятся необходимые параметры, среди которых:

$PI(1)_3, PI(2)_3, PI(3)_3$  — заданные значения параметра давления на входе каждого насоса;

$P2(1)_3, P2(2)_3, P2(3)_3$  — заданные значения параметра давления на выходе каждого насоса;

$T1_3, T2_3$  — заданные значения времени работы таймеров.

В процессе работы шахтного водоотлива режим работы его структурных элементов меняется. Начальные режимы работы этих элементов определяются их начальными значениями. Поэтому после ввода значений заданных параметров алгоритм производит присвоение начальных значений пе-



ременным, меняющим эти значения в соответствии с режимом работы структурных элементов шахтного водоотлива.

Одним из этих элементов являются датчики давления на входе насосов, показания которых записываются соответственно в переменных  $P1(1)$ ,  $P1(2)$ ,  $P1(3)$ . Эти показания должны быть в определенном логическом соотношении со значениями, записанными для каждого датчика в переменных  $P1(1)_3$ ,  $P1(2)_3$ ,  $P1(3)_3$ . Логика соответствия фактического значения давления на входе насоса с его заданным значением записывается в переменных  $KP1(1)$ ,  $KP1(2)$ ,  $KP1(3)$ , каждая из которых может принимать значение 0 или 1 (0 — соответствие, 1 — не соответствие). Первоначально параметры  $KP1(1) = 0$ ,  $KP1(2) = 0$ ,  $KP1(3) = 0$ .

Аналогично показания других датчиков давления на выходе рабочих насосов записываются в переменных  $P2(1)$ ,  $P2(2)$ ,  $P2(3)$ , а их заданные значения записаны соответственно в переменных:  $P2(1)_3$ ,  $P2(2)_3$ ,  $P2(3)_3$ . Логическое соответствие заданных и фактических значений этого параметра записывается соответственно в переменных:  $KP2(1)$ ,  $KP2(2)$ ,  $KP2(3)$ . Первоначально эти параметры равны  $KP2(1) = 0$ ,  $KP2(2) = 0$ ,  $KP2(3) = 0$ .

Рабочее состояние датчиков уровня воды в водосборнике записывается в переменных  $VU$ ,  $PU$ ,  $AU$ , которые при срабатывании соответствующего датчика принимают значение 1. Первоначально параметры  $VU = 0$ ,  $PU = 0$ ,  $AU = 0$  (уровень воды ниже верхней отметки).

Для контроля логики рабочего состояния заливочных насосов вводятся переменные  $KZN1$ ,  $KZN2$ ,  $KZN3$ , которые при отключенном состоянии этого насоса принимают значение 0. Если же насос работает, значение этого параметра равно 1. При аварийном состоянии заливочного насоса соответствующая переменная из этого списка становится равной 2. Первоначально насосы отключены, поэтому параметры  $KZN1 = 0$ ,  $KZN2 = 0$ ,  $KZN3 = 0$ .

В переменных  $KZI(1)$ ,  $KZI(2)$ ,  $KZI(3)$  записывается логическое состояние задвижек, при их закрытом состоянии этот

параметр принимает значение 0, если задвижка открыта, этот параметр принимает значение 1. При аварийном состоянии задвижки значение этого параметра равно 2. Первоначально параметры  $KZI(1) = 0$ ,  $KZI(2) = 0$ ,  $KZI(3) = 0$  (задвижки закрыты).

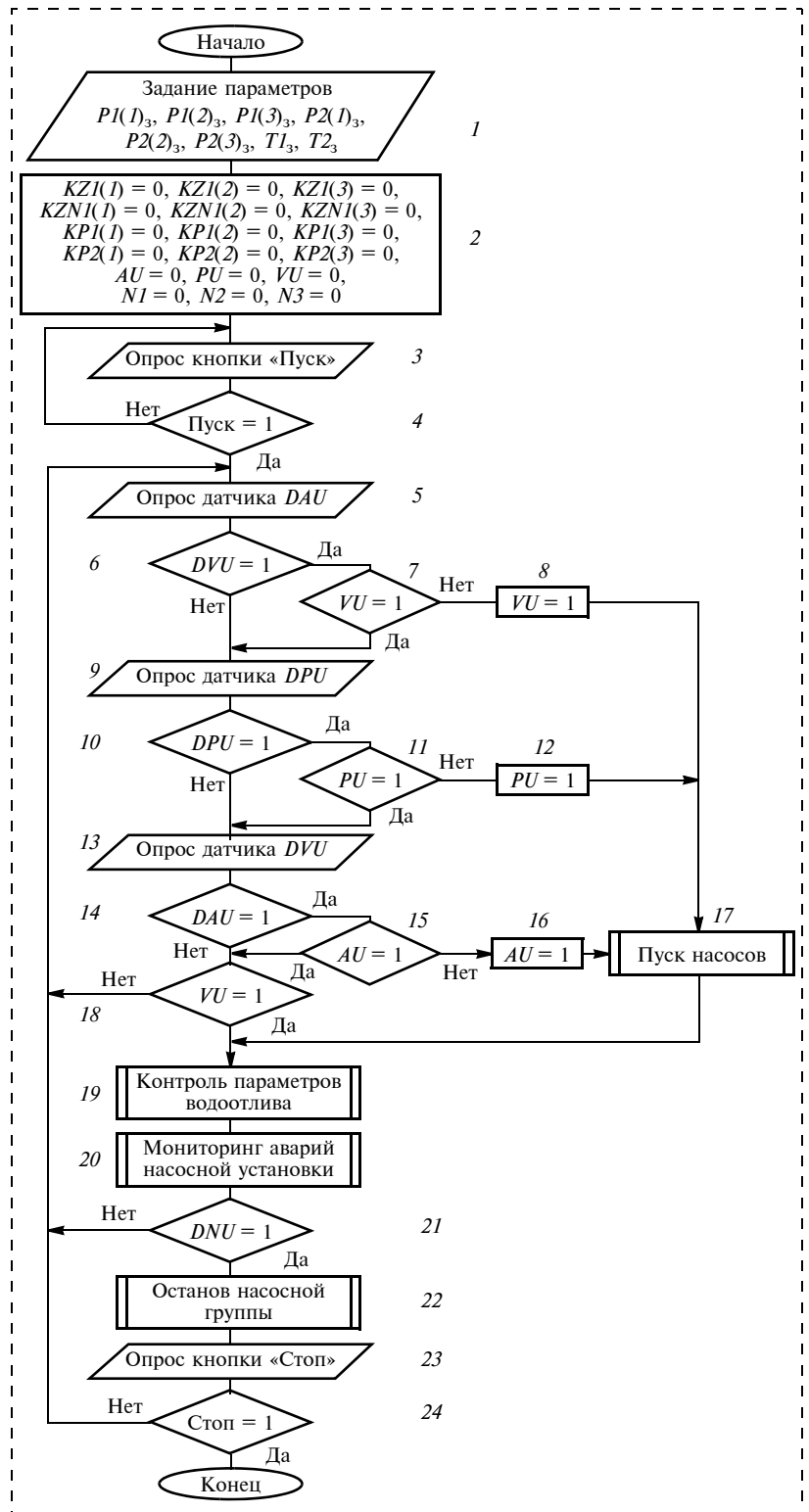


Рис. 2. Алгоритм управления шахтным водоотливом

Для анализа логического состояния технологической линии откачки воды (останов, работа, авария), в которую входят заливочный насос, рабочий насос и задвижка, вводятся переменные  $N1$ ,  $N2$ ,  $N3$ . По аналогии эти переменные при нерабочем состоянии конкретной линии принимают значение 0. Если линия находится в работе, значение этого параметра равно 1, а в случае аварийного состояния хотя бы одного из элементов в линии откачки воды значение параметра становится равным 2. Первоначальные значения параметров  $N1 = 0$ ,  $N2 = 0$ ,  $N3 = 0$  (водоотлив не работает).

Анализ логического состояния каждой насосной установки определяется параметрами  $AR1$ ,  $AR2$ ,  $AR3$ , которые принимают значение 0, если конкретная насосная установка работоспособна. При аварийном состоянии конкретной установки этот параметр становится равным 1. Значение этого параметра формируется локальной системой защитной автоматики для каждой насосной установки и передается в данный алгоритм.

После ввода исходных данных и присвоения исходных значений вышеописанным логическим переменным алгоритм переходит в режим циклического ожидания нажатия кнопки "Пуск". При нажатии этой кнопки алгоритм переходит к циклу опроса всех датчиков уровня воды в водосборнике. Этот цикл пошагово выполняется от оператора 5 до оператора 18 и продолжается до тех пор, пока не сработает датчик верхнего уровня (датчик  $DVU$ ).

При срабатывании этого датчика параметр  $DVU$  становится равным 1, поэтому оператором ветвления 6 алгоритм переводится к выполнению операторов 7 и 8. При этом оператором 8 переменной  $VU$  присваивается значение 1. В результате в ней сохраняется результат срабатывания датчика  $DVU$ , который изменяется на противоположный только тогда, когда сработает датчик  $DNU$  нижнего уровня воды в водосборнике.

После этого присвоения алгоритм переходит к оператору 17, который является подпрограммой пуска насоса. Содержание алгоритма этой подпрограммы будет рассмотрено позднее.

После выхода из подпрограммы "Пуск насосов" алгоритм переходит к последовательному выполнению двух подпрограмм — "Контроль параметров водоотлива" (оператор 19) и "Мониторинг аварий насосной установки" (оператор 20). В подпрограмме "Контроль параметров водоотлива" проводится циклический опрос рабочего состояния всех элементов работающих технологических линий откачки воды. В случае выхода из строя хотя бы одного

из элементов действующей линии в работу вводится резервная технологическая линия. В подпрограмме "Мониторинг аварий насосной установки" на пульте оператора должны выводиться сообщения возникших аварийных ситуаций в водоотливной установке.

После выхода из этих подпрограмм оператором 21 проверяется состояние датчика нижнего уровня воды в водосборнике (датчик  $DNU$ ), и пока он не сработает, этот оператор снова возвращает алгоритм к опросу состояния датчика  $DVU$  верхнего уровня (к оператору 5). При этом если даже уровень воды опустится ниже этого датчика ( $DVU$  перейдет в состояние 0), то оператором 7 по условию  $VU = 1$  алгоритм будет направлен к оператору 9 (к опросу датчика  $DPU$ ). Таким образом, работающая технологическая линия не будет отключена, а снова последовательно будут опрошены остальные датчики уровня. Этот опрос датчиков закончится на операторе 18, который уже по условию  $VU = 1$  снова направит алгоритм к выполнению подпрограмм "Контроль параметров водоотлива" (оператор 19) и "Мониторинг аварий насосной установки" (оператор 20). Далее этот процесс циклически повторяется до тех пор, пока не сработает датчик  $DNU$  нижней отметки уровня воды. При срабатывании этого датчика выполняется подпрограмма "Остановка насосной группы". По этой подпрограмме останавливается работа насосов всех работающих технологических линий. При выходе из этой подпрограммы опрашивается состояние кнопки "Стоп", в результате чего алгоритм ветвится на два направления. Если эта кнопка не нажата, то происходит возврат к оператору 5, при этом снова проверяется состояние датчиков контроля уровня воды в водосборнике. При нажатии на кнопку "Стоп" алгоритм прекращает свою работу.

В процессе откачки воды из водосборника может возникнуть такая ситуация, при которой приток воды в шахту будет выше производительности рабочего насоса. В результате этого уровень воды будет повышаться до повышенной отметки. При этом сработает датчик  $DPU$ , после чего параметру  $PU$  присваивается значение 1 и подпрограммой "Пуск насосов" в работу вступает очередная технологическая линия.

При дальнейшем росте уровня воды срабатывает датчик аварийной отметки  $DAU$ . При этом по аналогии параметр  $AU$  становится единичным и запускается в работу последняя технологическая линия откачки воды.

Подпрограммой "Пуск насосов" проводится выбор для запуска свободной и работоспособной на-

сосной технологической линии. Этот выбор осуществляется на основе анализа логического состояния параметров  $N1, N2, N3$ . Структура алгоритма этой подпрограммы показана на рис. 3.

После входа в эту подпрограмму операторами 1, 2 и 3 выполняется анализ логического состояния параметров  $N1, N2, N3$ , нулевое значение которых является признаком готовности соответствующей технологической линии к запуску. При истинности условия, заданного оператором 1, алгоритм входит в подпрограмму "Запуск насоса 1". Если этот насос находится уже в работе ( $N1 = 1$ ) или неисправны элементы его технологической линии ( $N1 = 2$ ), то алгоритм переходит к выполнению оператора 2, при этом аналогично выполняется уже подпрограмма "Запуск насоса 2". Структура этих подпрограмм одинакова, но отличаются они индексами однотипных переменных.

Таким образом, при ложности первого логического условия ( $N1 = 1$  или  $N1 = 2$ ) происходит переход анализу логического состояния следующей технологической линии. В случае одновременной ложности всех анализируемых условий (например,  $N1 = 1, N2 = 2$  или  $N3 = 1$ ) исключается возможность выбора свободной технологической линии. Поэтому перед выходом из этой подпрограммы алгоритм выдает сообщение "Нет резерва".

В каждой из подпрограмм "Запуск насоса  $N_i$ " формируется значение логического параметра  $N_i$  (оно может быть равно 1 или 2). В случае возникновения аварии при запуске технологической линии этот логический параметр принимает значение 2. В этом случае аварийная технологическая линия не запускается, но алгоритм обеспечивает переход к запуску последующей свободной линии. Например, в этом случае оператором 7 процесс запуска насоса передается к оператору 2. После успешного запуска в работу технологической линии подпрограмма завершает работу.

Запуск в работу конкретной технологической линии осуществляется подпрограммой "Запуск насоса  $N_i$ ". Структура алгоритма такой подпрограммы для всех насосов водоотливной установки одинакова. Отличаются эти подпрограммы только индексами однотипных переменных.

Для краткости изложения материала этой статьи мы рассмотрим структуру этой подпрограммы только для насоса 1, полагая что для остальных

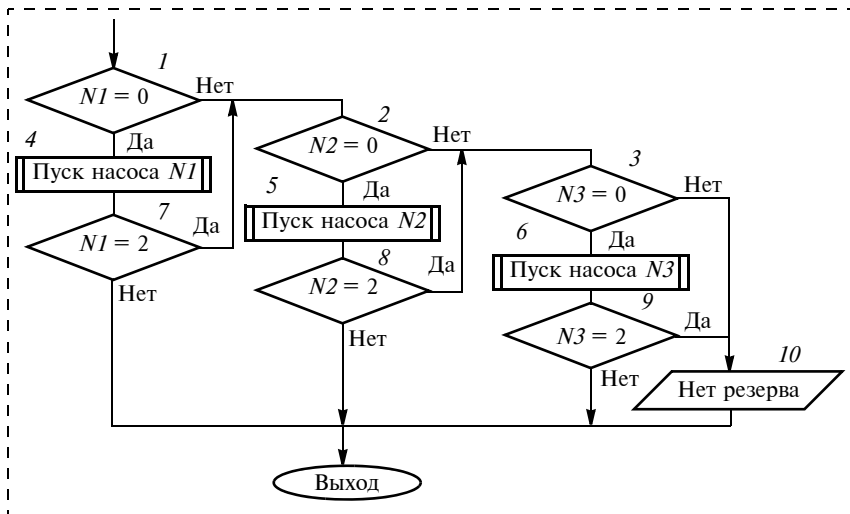


Рис. 3. Структура подпрограммы "Запуск насосов"

насосов эта подпрограмма одинакова. Структура подпрограммы "Запуск насоса 1" показана на рис. 4.

В водоотливных установках используют высоконапорные центробежные насосы, требующие предварительную заливку перед пуском их в работу. Для заливки этих насосов используют погружные заливочные насосы, которые запускаются на время, обеспечивающее полную заливку рабочего насоса и заданное давление  $PI(i)$  в его полости.

В нашем алгоритме контроль времени заливки насоса обеспечивает таймер  $T1$ , который запускается в работу в начале работы подпрограммы "Запуск насоса 1". После запуска в работу этого таймера включается заливочный насос, работа которого контролируется датчиком  $ZN1$ . В течение времени, заданного таймером  $T1$ , заливочный насос не только должен запуститься в работу, но и создать необходимое давление  $PI(i)$  в полости рабочего насоса. Если в течение заданного времени заливочный насос не запустится в работу, то оператором 5 алгоритм направляется к операторам 8 и 9, в результате переменные  $N1$  и  $KZN1$  приобретают значение 2 (не работает заливка насоса 1). После этого присвоения происходит выход из этой подпрограммы, а значения этих переменных сохраняются в памяти управляющего контроллера.

Если заливочный насос включился в работу, то оператором 4 параметру  $KZN1$  присваивается значение 1. После этого оператором 7 происходит переход к циклу контроля давления  $PI(I)$  в полости рабочего насоса. При этом за время  $T1$  это давление должно сравняться или превысить его заданное значение  $PI(I)_3$ . Если этого не произойдет, то оператором 16 таймер  $T1$  выключается, а оператором 18 запускается цикл выключения заливочного насоса.

Этот процесс также контролируется датчиком  $ZN1$ . После выключения этого насоса переменные  $NI$  и  $KPI(I)$  приобретают значения —  $NI = 2$ ,  $KPI(I) = 1$  (нет давления на входе насоса  $I$ ) и алгоритм направляется к выходу из этой подпрограммы. Значения этих переменных аналогично сохраняются в памяти управляющего контроллера.

Если в установленное время  $T1$  давление в полости рабочего насоса достигнет заданного значе-

ния, то оператором  $12$  таймер  $T1$  выключается и аналогично выключается заливочный насос. Последующий запуск рабочего насоса также должен контролироваться по времени. Для этой цели оператором  $17$  запускается в работу таймер  $T2$ . Вслед за этим вступает в работу цикл запуска насоса  $1$ . Запуск этого насоса контролируется датчиком  $DN1$ . Если в установленное время  $T2$  рабочий насос не запустится, то оператором  $25$  параметру  $NI$  присваивается значение 2 и подпрограмма заканчивает свою работу.

При успешном запуске рабочего насоса оператором  $27$  проверяется давление  $P2(I)$  на его выходе, которое должно за время  $T2$  сравняться или превысить заданное значение  $P2(I)_3$ . Если за это время этого не произойдет, то после выключения оператором  $32$  таймера  $T2$  запускается цикл остановки насоса  $1$ . Остановка этого насоса также контролируется датчиком  $DN1$ . После полной остановки этого насоса параметрам  $NI$  и  $KP2(I)$  присваиваются и записываются в память значения  $NI = 2$  и  $KP2(I) = 1$  (нет давления на выходе насоса  $I$ ). Затем подпрограмма заканчивает свою работу.

Если за время  $T2$  на выходе насоса  $NI$  установится заданное значение давления  $P2(I)_3$ , то оператором  $31$  запускается цикл открытия задвижки  $ZI(I)$ . Степень открытия этой задвижки контролируется датчиком  $ZI(I)$ . Эта задвижка должна полностью открыться, прежде чем истечет заданное время работы таймера  $T2$ . При успешном открытии задвижки параметрам  $NI$  и  $KZI(I)$  присваивается значение 1 (насос  $1$  работает, задвижка  $ZI(I)$  открыта), а оператором  $44$  таймер  $T2$  выключается и затем выполняется выход из подпрограммы.

Если за время  $T2$  задвижка не открывается, то операторами  $37$  и  $40$  алгоритм переводится к оператору  $32$  на выключение таймера  $T2$ , а затем аналогично запускается цикл выключения рабочего насоса  $NI$ . После остановки этого насоса параметрам  $NI$ ,  $KP2(I)$  и  $KZI(I)$  присваиваются значения  $NI = 2$ ,  $KP2(I) = 1$  и  $KZI(I) = 2$ ,

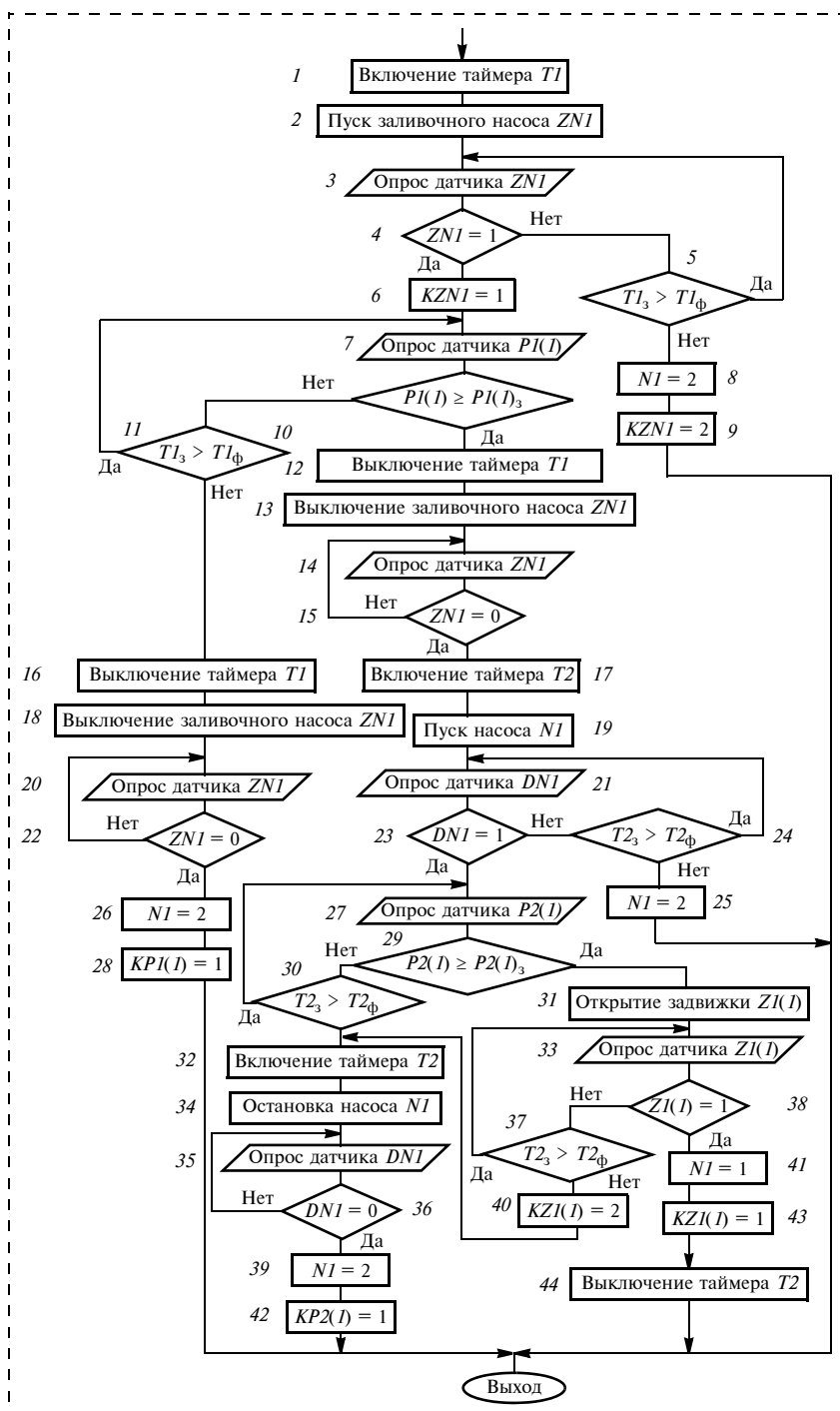


Рис. 4. Структура подпрограммы "Пуск насоса  $I$ "

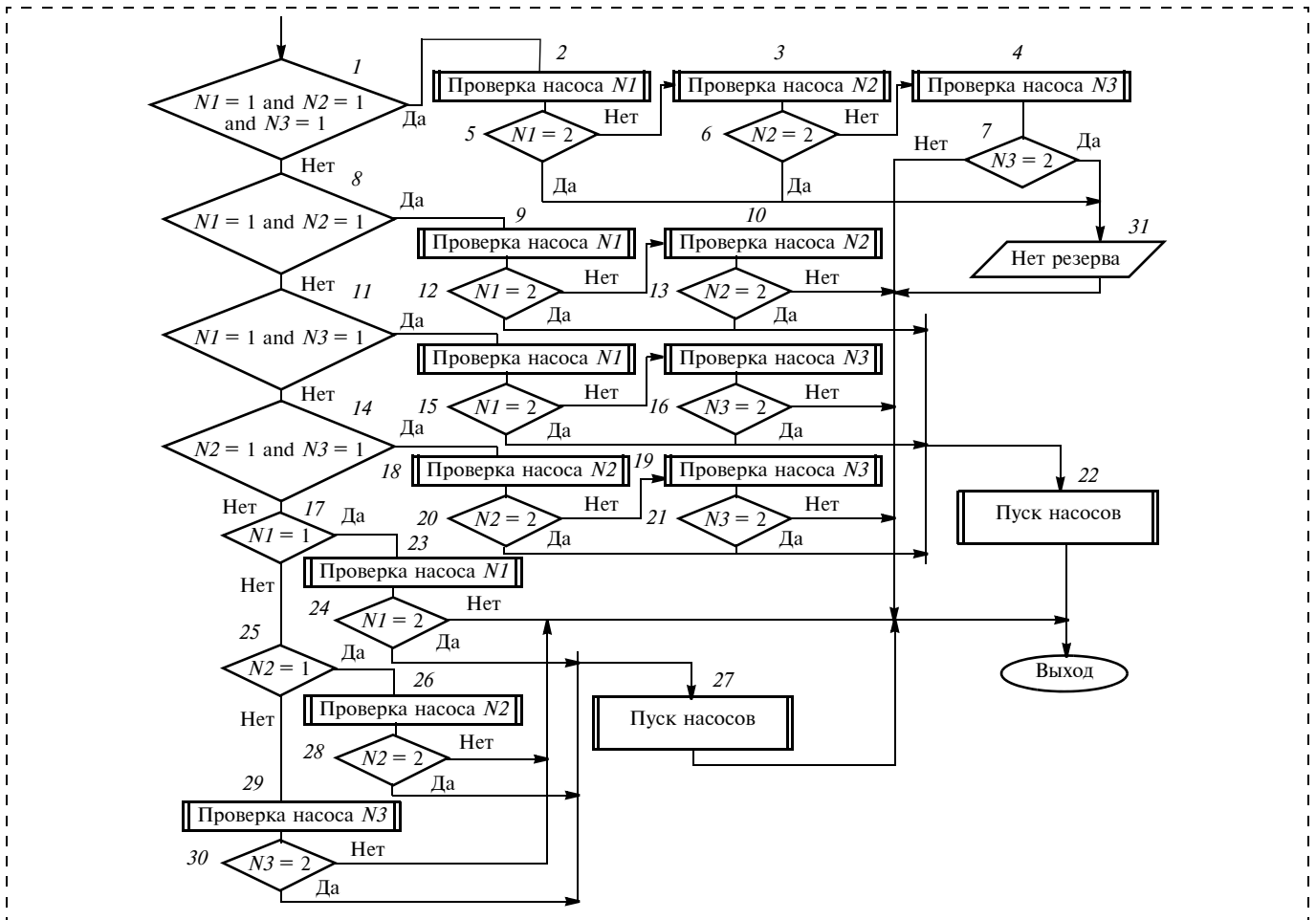


Рис. 5. Структура подпрограммы "Контроль параметров водоотлива"

которые запоминаются. После этого осуществляется выход из подпрограммы.

Постоянный контроль параметров работающих технологических линий откачки воды циклически выполняет подпрограмма "Контроль параметров водоотлива". Структура алгоритма этой подпрограммы показана на рис. 5.

При обращении к этой подпрограмме операторами ветвления 1, 8, 11, 14, 17 и 25 последовательно проверяются число и сочетание одновременно работающих насосных групп. При совпадении конкретного количественного сочетания этих групп соответствующим оператором ветвления последовательно запускаются подпрограммы контроля параметров каждого насоса, входящего в это сочетание. Например, если выполняется условие  $N1 = 1$  and  $N2 = 1$  and  $N3 = 1$  (одновременно работают все три насоса), то оператор 1 по условию "Да" направляет алгоритм к последовательному запуску подпрограмм "Проверка насоса N1", "Проверка насоса N2" и "Проверка насоса N3". При этом в случае обнаружения аварийной ситуации в результате

выполнения этих подпрограмм соответствующей логической переменной  $N_i$  присваивается значение 2, после чего в этом варианте сочетания работающих насосов нет возможности подключить в работу свободную технологическую линию. Поэтому прежде чем выйти из этой подпрограммы, алгоритм выдает сообщение "Нет резерва".

При других сочетаниях работающих насосов этот резерв должен быть, поэтому в этом случае аварийная технологическая линия перед выходом из подпрограммы заменяется резервной. Это осуществляется соответствующим обращением к подпрограмме "Пуск насосов".

Непосредственная проверка работоспособности технологической линии осуществляется подпрограммой "Проверка насоса  $N_i$ ", структура которой одинакова для всех технологических линий. Принцип работы этой подпрограммы рассмотрим на примере подпрограммы "Проверка насоса N1" (рис. 6).

Работоспособность технологической линии откачки воды из водосборника определяется исправ-

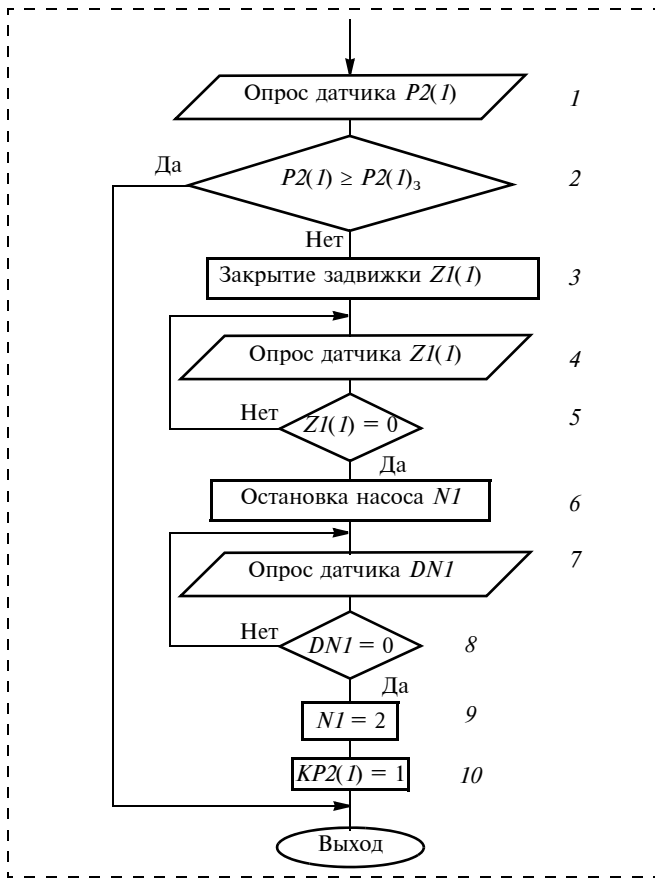


Рис. 6. Структура подпрограммы "Проверка насоса NI"

ностью запорной задвижки, датчика давления на выходе насоса и работоспособностью самого насоса.

Работоспособность задвижки проверяется на стадии ее открытия в соответствующих подпрограммах. Если она открыта, то значит она работоспособна и повторной проверки не требует. Работоспособность рабочего насоса должна контролировать локальная система его аварийной защиты. И в случае его неисправности эта система должна по сети управления изменить в нашем алгоритме значение параметра  $AR_i$  ( $AR_i = 1$ ). Параметр давления  $P2(i)$  на выходе работающего насоса контролируется соответствующим датчиком, показания которого опрашиваются оператором  $I$ . Если давление на выходе насоса соответствует заданному значению, то алгоритм направляется к выходу из этой подпрограммы. В противном случае открывается цикл закрытия задвижки  $ZI(I)$  с контролем этого процесса по показаниям датчика  $ZI(I)$ . После выхода из этого цикла запускается цикл остановки насоса  $NI$ . Остановка этого насоса контролируется датчиком  $DNI$ . После полной остановки насоса параметрам  $NI$  и  $KP2(I)$  присваиваются значения  $NI = 2$ ,  $KP2(I) = 1$ , затем обеспечивается выход из этой подпрограммы. Структура подпрограмм "Проверка насоса  $N_i$ " для других насосов аналогична.

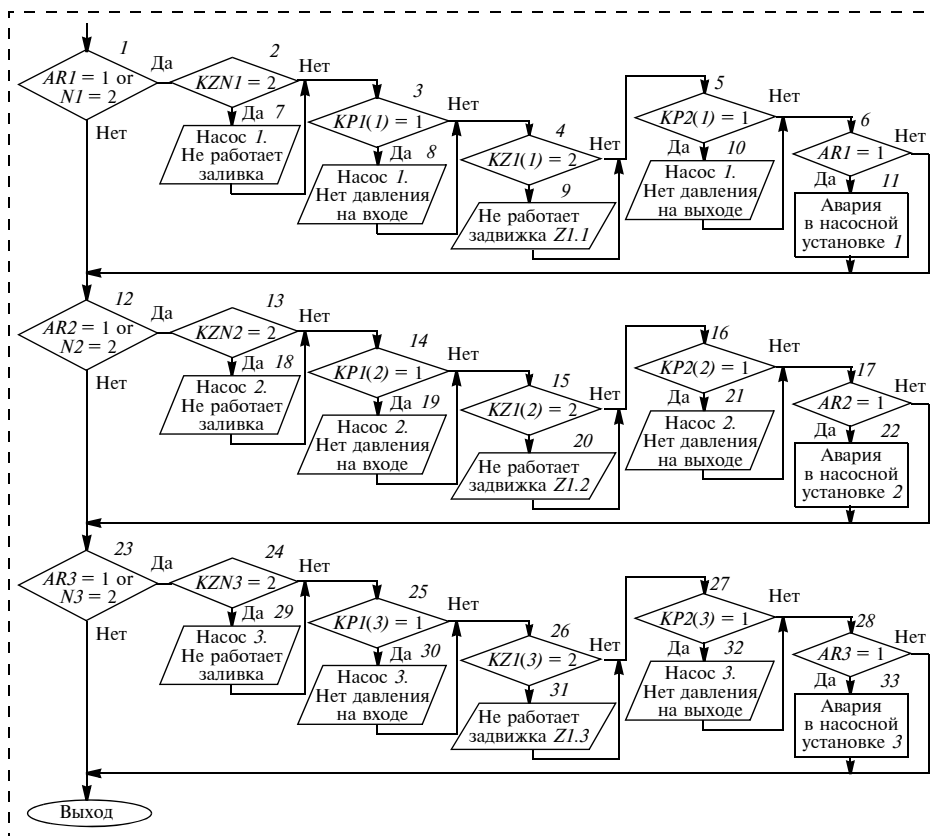


Рис. 7. Структура подпрограммы "Мониторинг аварий насосной установки"

Как отмечалось выше, в общей структуре алгоритма вслед за подпрограммой "Контроль параметров водоотлива" следует подпрограмма "Мониторинг аварий насосной установки". Структура алгоритма этой подпрограммы показана на рис. 7.

Логика отображения аварийной ситуации на экране монитора оператора заключается в том, что при входе в эту подпрограмму последовательно проверяется истинность одного из двух событий. К первому нужно отнести наличие аварийной ситуации в насосной установке, о чем свидетельствует единичное состояние одного из параметров  $AR_i$ . Вторым условием наличия аварийной ситуации в работе технологических линий откачки воды является значение па-

раметра  $N_i$ , равное числу 2. Если при последовательном опросе операторами 1, 12, 21 наличия этих событий не наблюдается, то происходит выход из подпрограммы без вывода всяких сообщений. При наличии хотя бы одного из этих событий алгоритм переходит на ветвь уточнения аварийных факторов. При этом для каждой технологической линии последовательно проверяется логическое состояние параметров  $KZN_i$ ,  $KZI(i)$ ,  $KPI(i)$ ,  $KP2(i)$  и  $AR_i$ . При условии аварийности на мониторе оператора для каждого из насосов появляются следующие сообщения: "Не работает заливка" (при  $KZN_i = 2$ ), "Не работает задвижка" (при  $KZI(i) = 2$ ), "Нет давления на входе" (при  $KPI(i) = 1$ ), "Нет давления на выходе" (при  $KP2(i) = 1$ ), "Авария в насосной установке" (при  $AR_i = 1$ ). После вывода одного или нескольких из этих сообщений алгоритм спрашивает наличие всех последующих аварийных ситуаций и только после этого происходит выход из этой подпрограммы.

Выключение насосов работающей технологической группы происходит подпрограммой "Останов насосной группы" (рис. 8), которая запускается только тогда, когда сработает датчик  $DNU$  нижнего уровня воды в водосборнике, выключая одновременно все работающие насосы. При входе в эту подпрограмму, как и прежде, проверяется логическая совокупность одновременно работающих насосов. Первоначально проверяется наличие одновременно трех работающих насосов (оператор 1), затем проверке подлежат совокупности работающих насосных пар (операторы 9, 25, 41). На завершающем этапе операторами 59 и 66 этой проверке под-

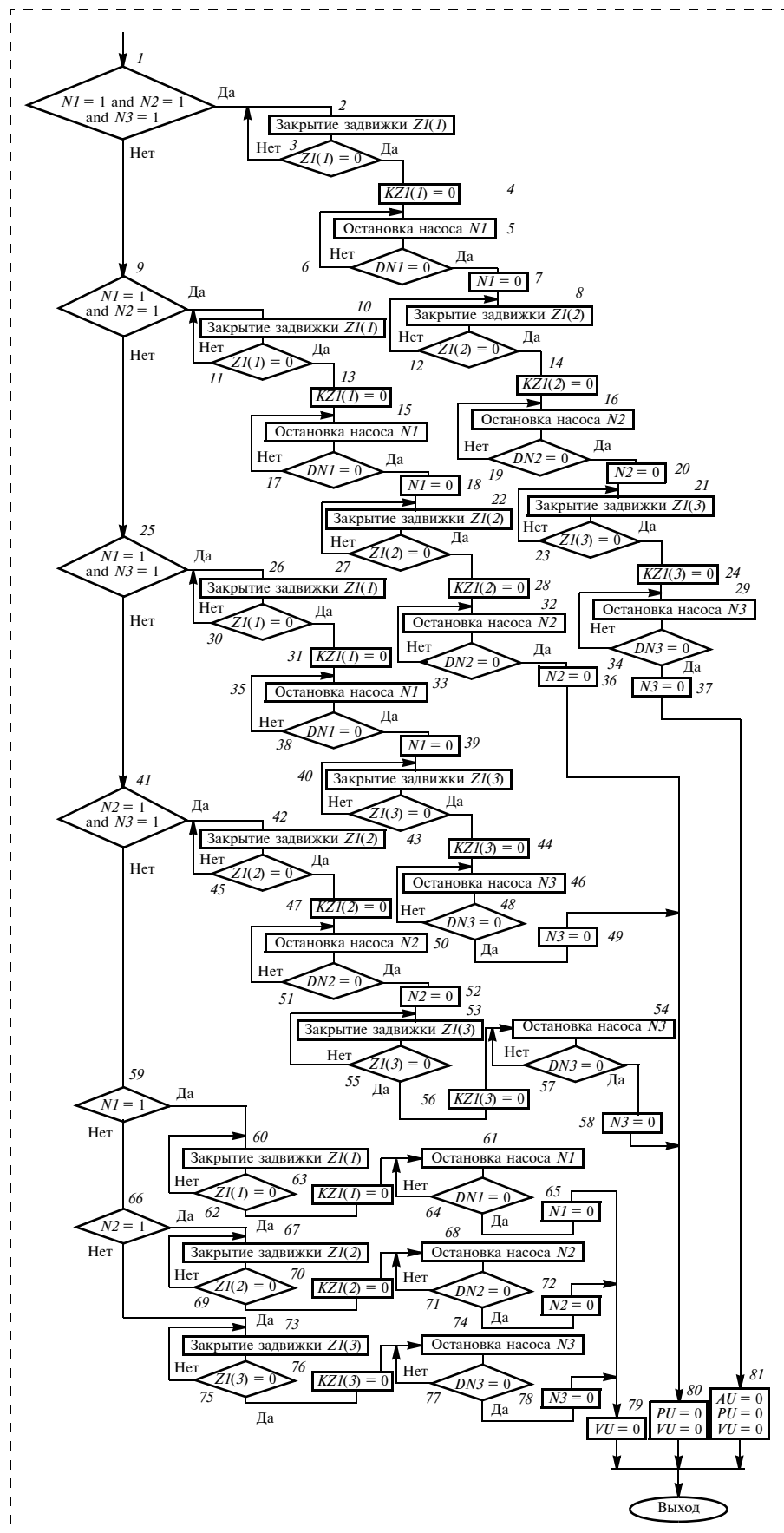


Рис. 8. Структура алгоритма подпрограммы "Останов насосной группы"

вергаются одиночно работающие насосы. При обнаружении определенной совокупности работающих насосных групп подпрограмма по логическому направлению "Да" последовательно выполняет такие действия: первоначально в цикле закрывает соответствующую задвижку, а затем в аналогичном цикле останавливает работу насоса. Продолжительность каждого из этих циклов контролируется состоянием соответствующих датчиков  $ZI(i)$  и  $DN_i$ . После выполнения каждого из этих циклов работа насоса конкретной технологической линии завершается, а параметру  $N_i$  присваивается значение 0. После этого аналогично запускаются циклы остановки насоса последующих технологических линий. Например, если одновременно работают все три насоса, то по условию " $N1 = 1$  and  $N2 = 1$  and  $N3 = 1$ " оператор  $I$  по направлению "Да" алгоритм закрывает задвижку  $ZI(1)$ , а затем останавливает насос  $N1$ . В результате после обнуления параметра  $N1$  аналогично закрывается сначала задвижка  $ZI(2)$  и останавливается насос  $N2$ , а после присвоения параметру  $N2$  значения 0 то же самое происходит с задвижкой  $ZI(3)$  и насосом  $N3$ , при этом параметр  $N3$  также обнуляется.

Аналогичные процедуры совершаются и при других логических сочетаниях работающих насосов. Однако полная остановка насосов соответствующей технологической линии должна обеспе-

чить доступ к подпрограмме "Пуск насосов" при срабатывании соответствующих датчиков уровня воды. Поэтому после одновременной остановки трех насосов одновременно обнуляются параметры  $AU$ ,  $PU$  и  $VU$ . Если останавливаются только два насоса, то обнулению подлежат только параметры  $PU$  и  $VU$ . При остановке только одного насоса обнуляется параметр  $VU$ . В результате такого обнуления осуществляется разблокировка соответствующих датчиков уровня, поэтому они снова могут включать в работу насосы соответствующих технологических линий.

Как отмечалось раньше, представленный алгоритм может работать в непрерывном цикле опроса датчиков уровней до тех пор, пока не будет нажата кнопка "Стоп". При нажатии на эту кнопку алгоритм прекращает свою работу. Это возможно только после полной остановки работы всех насосов.

#### Список литературы

1. **Иванов А. А.** Автоматизация процессов подземных горных работ. Киев, Донецк: Вища школа, 1987. 328 с.
2. **Мелькумов Л. Г.** Системы и устройства автоматики для горных предприятий на основе микроэлектроники и микропроцессорной техники. М.: Недра, 1992. 363 с.
3. **Толпежников Л. А.** Автоматизация подземных горных работ. М.: Недра, 1976. 352 с.
4. **Сажин Р. А.** Автоматизация технологических процессов горного производства. Пермь: ПГТУ, 2009.

R. A. Sazhin, Professor, e-mail: eagp@mail.ru, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

## The Algorithm of Automated Management of the Mine Dewatering Installation

*The issues about basic requirements for the mine drainage systems of automation were reviewed, on the basis of which, the algorithm of this drainage in the automated mode was determined. And the included subprogram's was determined too.*

**Keywords:** system of automation, algorithm, program, mine dewatering installation

#### References

1. **Ivanov A. A.** *Avtomatizaciya processov podzemnyh gornyh rabot*, Kiev, Doneck, Vishcha shkola, 1987, 328 p. (in Russian).
2. **Mel'kumov L. G.** *Sistemy i ustrojstva avtomatiki dlya gornyh predpriyatij na osnove mikroelektroniki i mikropro-*

*cessornoj tekhniki*, Moscow, Nedra, 1992, 363 p. (in Russian).

3. **Tolpezhnikov L. A.** *Avtomatizaciya podzemnyh gornyh rabot*, Moscow, Nedra, 1976, 352 p. (in Russian).
4. **Sazhin R. A.** *Avtomatizaciya tekhnologicheskikh processov gornogo proizvodstva*, Perm, PGU, 2009 (in Russian).



## Многоступенчатая система автоматического ввода резерва на основе источников бесперебойного питания в системах электроснабжения объектов горных предприятий

*Рассмотрены вопросы повышения надежности электроснабжения электротехнических комплексов горных предприятий. Выполнен анализ систем электроснабжения и разработана структура, обеспечивающая бесперебойное электроснабжение ответственных потребителей с использованием многоступенчатой системы автоматического ввода резерва. Обоснована необходимость использования источников бесперебойного питания для минимизации перерыва энергоснабжения ответственных потребителей. Предложена структура системы электроснабжения, которая обеспечивает минимизацию перерыва энергоснабжения ответственных потребителей, на основе источников бесперебойного питания, тиристорных коммутаторов и системы управления, обеспечивающей фазовую синхронизацию при вводе и переключении резервных источников питания.*

**Ключевые слова:** энергосистема, надежность, электрические сети, гарантированное, бесперебойное, энергосбережение

### Актуальность

Существующая централизованная энергосистема РФ не является абсолютно надежной и допускает наличие перерывов в электроснабжении наиболее ответственных по критерию устойчивости технологического процесса потребителей. Централизованное электроснабжение ответственных промышленных объектов с требуемым качеством и уровнем надежности может осложняться рядом особенностей, таких как распределение сложных технологических объектов и крупных электроприемников на большой территории и удаленность от централизованных энергосистем, что является ключевой особенностью предприятий минерально-сырьевого комплекса.

В Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2030 года поставлена задача повысить вероятность бездефицитной работы централизованной энергосистемы с  $P = 0,996$  до  $P = 0,9997$  и приблизить этот показатель к зарубежным нормам надежности [1]. Однако согласно проведенным исследованиям и расчетам выявлено, что уровень надежности централизованных сетей РФ находится в диапазоне  $0,95...0,97$ , что ниже нормативного показателя  $0,996$ . Поэтому переход на норматив надежности, предусмотренный Энергетической стратегией России, даже в отдаленной перспективе потребует больших инвестиций в развитие и повышение надежности всех компонентов энергосистемы [1].

Оценка показателей надежности энергосистем должна выполняться с учетом риска возникнове-

ния аварий при нарушении электроснабжения опасных производственных объектов и наиболее ответственных потребителей по критерию устойчивости и непрерывности технологического процесса. При этом на большинстве предприятий минерально-сырьевого комплекса присутствуют объекты, относящиеся к первой и особой группе первой категории по надежности электроснабжения. Также необходимо учитывать наличие локальных источников электроснабжения, которые осуществляют резервирование централизованного питания и могут работать параллельно с энергосистемой.

По результатам многочисленных теоретических и экспериментальных исследований были установлены длительности нарушений электроснабжения, нарушающих устойчивость режимов работы как отдельного электрооборудования, так и электротехнического комплекса в целом. Например, длительность провала напряжения до  $0,4...0,5U_{ном}$  при длительности нарушения электроснабжения  $T_{НЭ} > 0,15$  с приведет к выпадению из синхронизма синхронных, опрокидыванию асинхронных электроприводов, что повлечет за собой снижение технологических параметров и, как следствие, расстройство сложных технологических процессов, на восстановление которых может потребоваться значительное время [2, 3].

В последнее время, в связи с постоянным усложнением технологического процесса, широко внедряются системы гарантированного и бесперебойного электроснабжения ответственных потребителей, имеющих в своем составе модули беспере-

бойного питания, а также генераторные установки различных типов, выбор которых зависит от специфики производственного процесса (климат, тип добываемого энергоносителя) [4]. Также существует большое число используемых буферных накопителей энергии: аккумуляторные батареи, суперконденсаторные установки, накопители кинетической энергии, топливные элементы. Причем преимущественно используются источники бесперебойного питания (ИБП), работающие в режиме on-line. Согласно стандарту IEC 62040-3 обеспечить устойчивую работу и нулевое время прерывания электропитания энергосистемы может только ИБП класса VFI-SS-111 [5].

### Гарантированное и бесперебойное электроснабжение

При проведении исследований необходимо учитывать различия между терминами *гарантированное* и *бесперебойное* электроснабжение объекта. *Гарантированным* является электроснабжение от основного и одного или нескольких резервных источников, при котором *гарантируется ограничение длительности* возможных кратковременных прерывов в поступлении электроэнергии к электроустановкам предприятия. Таким образом, наличие кратковременных нарушений электроснабжения в этом случае допускается. *Бесперебойным* же является электроснабжение от основного и одного или нескольких резервных источников, при котором поступление электроэнергии к электроустановкам предприятия осуществляется в *непрерывном режиме* [6]. Также следует учесть, что источники электроснабжения ответственных объектов должны быть взаимно резервируемыми.

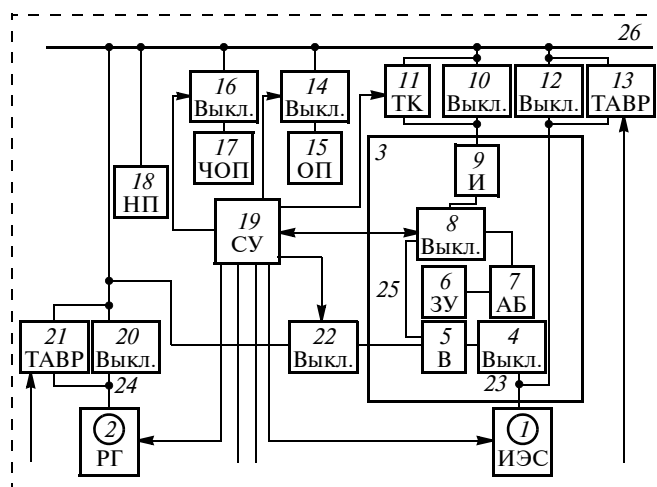
При расчете длительности нарушений электроснабжения, в течение которой ответственные потребители будут получать электроэнергию недопустимых параметров, в том числе с точки зрения показателей качества [7], и осуществляется ввод резервного питания, важно учитывать согласование напряжений разных источников по фазе. Современные системы автоматического ввода резерва способны выполнять полный цикл переключения с основной на резервную линию электропитания за  $t = 5...35$  мс в зависимости от аварии, при этом время синхронизации может достигать 2 мс [2, 3].

### Многоступенчатая система автоматического ввода резерва

В целях обеспечения бесперебойного электроснабжения ответственных потребителей объектов

минерально-сырьевого комплекса разработана многоступенчатая система автоматического ввода резерва.

Устройство бесперебойного электроснабжения неотключаемых потребителей работает следующим образом. В нормальном режиме электроснабжение всех потребителей осуществляется от источника электроснабжения 1 (рисунок). При аварийной ситуации со стороны источника электроснабжения 1, во время запуска и выхода на номинальный режим резервного генератора 2 электроснабжение неотключаемых потребителей осуществляется за счет отдачи энергии аккумуляторной батареей. Для ликвидации дефицита мощности резервного генератора 2 осуществляется поочередное отключение потребителей в соответствии со степенями разгрузки. Алгоритм переключения между тремя источниками электроснабжения и согласование их совместной работы заложен в системе управления 19.



Система двухступенчатого ввода резерва:

1 — источник электроснабжения (ИЭС), в роли которого может выступать централизованная энергосистема или автономная электростанция; 2 — резервный генератор (РГ); 3 — блок развязки с энергосистемой; 4 — выключатель для подключения выпрямителя к шине автономной электростанции; 5 — выпрямитель (В); 6 — зарядное устройство (ЗУ); 7 — аккумуляторная батарея (АБ); 8 — выключатель, подключающий аккумуляторную батарею к инвертору, а также обеспечивающий питание от аккумуляторных батарей и выпрямителя; 9 — инвертор (И); 10 — выключатель для подключения инвертора к главной шине переменного тока; 11 — тиристорный коммутатор (ТК); 12 — выключатель для подключения автономной электростанции к главной шине переменного тока; 13, 21 — тиристорные устройства автоматического ввода резерва (ТАВР); 14 — средства автоматического отключения полностью отключаемых потребителей; 15 — полностью отключаемые потребители (ОП); 16 — средства автоматического отключения частично отключаемых потребителей; 17 — частично отключаемые потребители (ЧОП); 18 — неотключаемые потребители (НП); 19 — система управления (СУ); 20 — выключатель, использующийся для подключения резервного генератора; 22 — выключатель, подключающий выходные шины переменного тока резервного генератора к выпрямителю; 23 — шины переменного тока автономной электростанции; 24 — шины переменного тока резервного генератора; 25 — шины постоянного тока, соединяющие выпрямитель с выключателем для подключения аккумуляторной батареи к инвертору; 26 — главные шины переменного тока

При запуске резервного генератора 2 и его последующем подключении ответственные потребители получают питание от аккумуляторной батареи 7. Синхронизация между одноименными напряжениями  $U_{И}$  на выходе инвертора 9 и  $U_{РГ}$  резервного генератора 2 обеспечивается с помощью тиристорного коммутатора 11 и устройства ТАВР 21. Чтобы избежать возникновения сверхтоков при подключении резервного генератора 2 к главной шине переменного тока 26 необходимо, чтобы угол фазового рассогласования между соответствующими напряжениями не превышал 30 электрических градусов. В противном случае происходит рост токов вплоть до двукратного в случае подключения резервного генератора 2 к главной шине переменного тока 26 в момент нахождения фаз в противофазе, что приведет к срабатыванию средств релейной защиты и автоматики с возникновением перерыва электроснабжения, приводящего к нарушению технологического процесса.

Для подключения резервного генератора 2 без рассогласования фаз между его выходным напряжением с выходным напряжением инвертора 9 параллельно выключателю 20 подключено устройство ТАВР 21. Это устройство предназначено для сохранения в работе неотключаемых потребителей при возникновении аварийного режима — потери питающего напряжения на одном из вводов, путем максимально быстрого переключения на исправный ввод без возникновения сверхтоков.

Оптимизация переходных процессов по критерию минимизации фазового рассогласования напряжений источников обеспечивается синхронизацией момента включения устройства ТАВР с углом расхождения фаз напряжений на клеммах генератора с напряжением на выходе инвертора в диапазоне от 0 до 30 электрических градусов. Устройство ТАВР 21 позволяет осуществлять синхронное переключение питаемой нагрузки на резервный генератор с углом фазового рассогласования не более 30 электрических градусов, а также контролировать восстановление напряжения в основной сети с автоматическим переключением на нормальную схему электроснабжения после восстановления напряжения на неисправном вводе. При восстановлении нормального режима электроснабжения от источника электроснабжения 1 также существует опасность увеличения угла фазового рассогласования между одноименными напряжениями  $U_{ИЭС}$  на выходе источника электроснабжения 1 и  $U_{РГ}$  резервного генератора 2. Для предотвращения этого параллельно выключателю 12

подключено устройство ТАВР 13. После ликвидации аварийного режима срабатывает тиристорный коммутатор 11, включенный параллельно выключателю 10, для исключения возможности перетока энергии от инвертора 9 в сеть. Система управления 19 контролирует совместную работу устройств ТАВР 13 и 21 и тиристорного коммутатора 11 для обеспечения синхронизации ввода в работу различных источников электроснабжения.

Во время аварийного режима энергия аккумуляторных батарей 7 расходуется на питание неотключаемых потребителей 18 при переключении с источника электроснабжения 1 на резервный генератор 2. Эта энергия должна быть восстановлена до номинала. С этой целью выключатель 22 подключает шины переменного тока 24 резервного генератора 2 к блоку выпрямителя 5. Зарядное устройство 6 обеспечивает и поддерживает необходимый уровень заряда на аккумуляторных батареях 7, а выключатель 8 не допускает перетока мощности в инвертор 9, а также обеспечивает постоянное питание системы управления 19. В случае неисправности на аккумуляторных батареях 7 предусматривается питание системы управления по шинам постоянного тока 25, соединяющим выключатель 8 и выпрямитель 5.

Важно отметить, что команды на отключение неотключаемых потребителей, питание критической нагрузки, а также запуск резервных генераторов должны поступать синхронно. Кроме того, блок развязки с энергосистемой может быть заменен на источник бесперебойного питания двойного преобразования или типа on-line, соответствующая классу VFI-SS-111.

Мощность аккумуляторных батарей должна выбираться из учета постоянного питания системы управления при поддержании номинального режима работы неотключаемых потребителей на время переключения между источником электроснабжения и резервным генератором, а в случае невозможности запуска резерва емкость аккумуляторных батарей должна обеспечить безаварийное завершение технологических процессов на неотключаемых потребителях.

Рассмотренная многоступенчатая система автоматического ввода резерва обеспечивает бесперебойное электроснабжение потребителей первой категории и особой группы потребителей, включая комплексы управления горными машинами и системами противоаварийной автоматики.

*Результаты исследований, приведенные в данной статье, получены в рамках реализации гранта*

СП-671.2015.1 "Энергоэффективная система повышения качества электрической энергии в условиях микросетей с распределенной генерацией на основе альтернативных и возобновляемых источников энергии" стипендии Президента Российской Федерации.

#### Список литературы

1. **Овсейчук В. А.** Надежность и качество электроснабжения потребителей // *Новости Электротехники*. 2013. № 3. С. 50—53.
2. **Абрамович Б. Н., Устинов Д. А., Поляков В. Е.** Динамическая устойчивость работы установок электроцентробежных насосов // *Нефтяное хозяйство*. 2010. № 9. С. 104—106.
3. **Абрамович Б. Н., Муратбаекеев Э. Х., Медведев А. В., Старостин В. В.** Минимизация ущерба при добыче неф-

ти из-за кратковременных перерывов электроснабжения // *Промышленная энергетика*. 2009. № 7. С. 25—28.

4. **Абрамович Б. Н., Сычев Ю. А., Устинов Д. А., Федоров А. В.** Система гарантированного электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса с использованием альтернативных и возобновляемых источников энергии // *Промышленная энергетика*. 2013. № 1. С. 14—16.

5. **IEC 62040—3.** Uninterruptible power systems (UPS). Part 3: Method of specifying the performance and test requirements.

6. **ГОСТ 45.55—99.** Системы и установки питания средств связи взаимовязанной сети связи Российской Федерации. М.: ЦНТИ "Информсвязь", 1999. 9 с.

7. **ГОСТ 32144—13.** Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.

**B. N. Abramovich**, Professor, e-mail: babramov@mail.ru,  
**Yu. A. Sychev**, Associate Professor, e-mail: Sychev\_yura@mail.ru,  
**A. V. Fedorov**, Postgraduate Student, e-mail: alexey.fav89@gmail.com,  
National Mineral Resources University "University of Mines", Saint Petersburg, Russia

## Multistage Automatic Transfer Switch System in Power Supply Systems of Mining Enterprises Objects on the Basis of Uninterruptible Power Supplies

*The problems of reliability improving of power supply mining enterprises electrical systems are considered. Structural schemes of power supply are analyzed to develop a framework and to provide uninterrupted power supply of responsible consumers by multistage automatic transfer switch system. The necessity of the uninterruptible power supply using to minimize the power supply interruption of responsible consumers is justified. The structure of the power supply system, which minimizes the power supply interruption of responsible consumers, based on uninterruptible power supplies, thyristor switches and controls, provides the phase synchronization with the input switching and redundant power supplies is proposed.*

**Keywords:** power system, reliable electrical network, guaranteed and uninterrupted power supply

#### References

1. **Ovsejchuk V. A.** *Nadezhnost' i kachestvo jelektronsnabzhenija potrebitelej*, *Novosti Jelektrotehniki*, Moscow, 2013, no. 3, pp. 50—53 (in Russian).
2. **Abramovich B. N., Ustinov D. A., Poljakov V. E.** *Dinamicheskaja ustojchivost' raboty ustanovok jelektrocentrobezhnyh nasosov*. *Nefjanoe Hozjajstvo*, Moscow, 2010, no. 9, pp. 104—106 (in Russian).
3. **Abramovich B. N., Muratbakeev Je. H., Medvedev A. V., Starostin V. V.** *Minimizacija ushherba pri dobyche nefi iz-za kratkovremennyh pereryvov jelektronsnabzhenija*. *Promyshlennaja Jenergetika*, Moscow, 2009, no. 7, pp. 25—28 (in Russian).

4. **Abramovich B. N., Sychev Ju. A., Ustinov D. A., Fedorov A. V.** *Sistema garantirovannogo jelektronsnabzhenija predpriyatij mineral'no-syr'evogo kompleksa s ispol'zovaniem al'ternativnyh i vozobnovljaemyh istochnikov jenerгии*. *Promyshlennaja Jenergetika*, Moscow, 2013, no. 1, pp. 14—16 (in Russian).

5. **IEC 62040—3.** Uninterruptible power systems (UPS). Part 3: Method of specifying the performance and test requirements.

6. **GOST 45.55—99.** *Sistemy i ustanovki pitaniya sredstv svjazi vzaimovjazannoj seti svjazi Rossijskoj Federacii*, Moscow, CNTI "Informsvjaz", 1999, 9 p. (in Russian).

7. **GOST 32144—13.** *Normy kachestva jelektrojenerгии v sistemah jelektronsnabzhenija obshhego naznachenija*, Moscow, Standartinform, 2014, 16 p. (in Russian).

УДК 622.258

**Г. Д. Трифанов**, д-р техн. наук, доц., **В. Ю. Зверев**, асп., ПНИПУ,  
**М. А. Стрелков**, канд. техн. наук, инженер-программист, Региональный канатный центр, г. Пермь  
E-mail: kanat@pstu.ru

## **Экспериментальные исследования влияния режима работы шахтных подъемных установок на динамические нагрузки в канате**

---

*Описаны результаты проведения экспериментальных исследований режима работы подъемной установки. Проведен анализ полученных данных, по результатам которого сделаны выводы о воздействии динамических нагрузок на канат на различных этапах подъема скипа. Описаны причины их появления. Оценено влияние динамических нагрузок на долговечность каната.*

**Ключевые слова:** шахтная подъемная установка, скип, канат, динамическая нагрузка, долговечность, режим работы

Рост производительности шахтного подъемного комплекса неразрывно связан с увеличением интенсивности подъема, включающим применение скипов с большей грузоподъемностью при более высоких скоростях движения. Из исследований работы подъемных установок известно, что движение сосуда сопровождается колебаниями и, как следствие, динамическими нагрузками, воздействующими на все оборудование, включая и канат. Эти нагрузки снижают долговечность каната, что повышает затраты на эксплуатацию подъемного комплекса и снижает надежность его работы. Из опыта эксплуатации подъемных установок известно, что при увеличении скорости движения и массы подъемных сосудов динамические явления в канате значительно возрастают.

Канат подъемной установки испытывает нагрузку, направленную на его растяжение, изменение которой имеет циклический характер. Это связано с режимом работы подъемной установки. Нагрузочный цикл каната включает спуск порожнего скипа и подъем груженого, загрузку и разгрузку скипа. Динамические усилия в канате при этом связаны с ускорениями при разгоне и торможении подъемной машины, а также при движении подъемного сосуда в шахтном стволе. Загрузка и разгрузка сосудов сопровождаются резким изменением массы подъемного сосуда на канате, что приводит к возбуждению колебаний и возникновению динамических нагрузок в системе.

Вышеперечисленные неблагоприятные условия режима работы каната, связанные с колебаниями в системе и воздействием переменной нагрузки, обуславливают усталостный характер его разрушения. Теоретические положения долговечности и экспериментальные исследования показывают, что долговечность стального каната уменьшается при воздействии пульсирующих растягивающих нагрузок и должна определяться с учетом колебательного вида нагружения каната. Условия работы и характер его нагружения напрямую связаны с применяемым на подъемной установке оборудованием и режимом его работы.

В рамках изучения влияния кинематических параметров подъема на возникновение динамических явлений в канате были проведены экспериментальные исследования по определению фактического режима работы оборудования подъемных установок. При этом использована информация с регистраторов параметров подъемной установки.

Для оценки величины и характера динамических нагрузок, возникающих при работе подъемной установки, применен метод измерения ускорений скипа. Методика исследований включала монтаж, измерение и запись с датчиков вертикальных ускорений скипа в течение нескольких циклов работы подъемной установки. Измерения проводились специальной аппаратурой АРМИР [1], установленной на скипе, при автоматическом режиме работы подъемной машины. В результате проведения исследований динамики подъемной

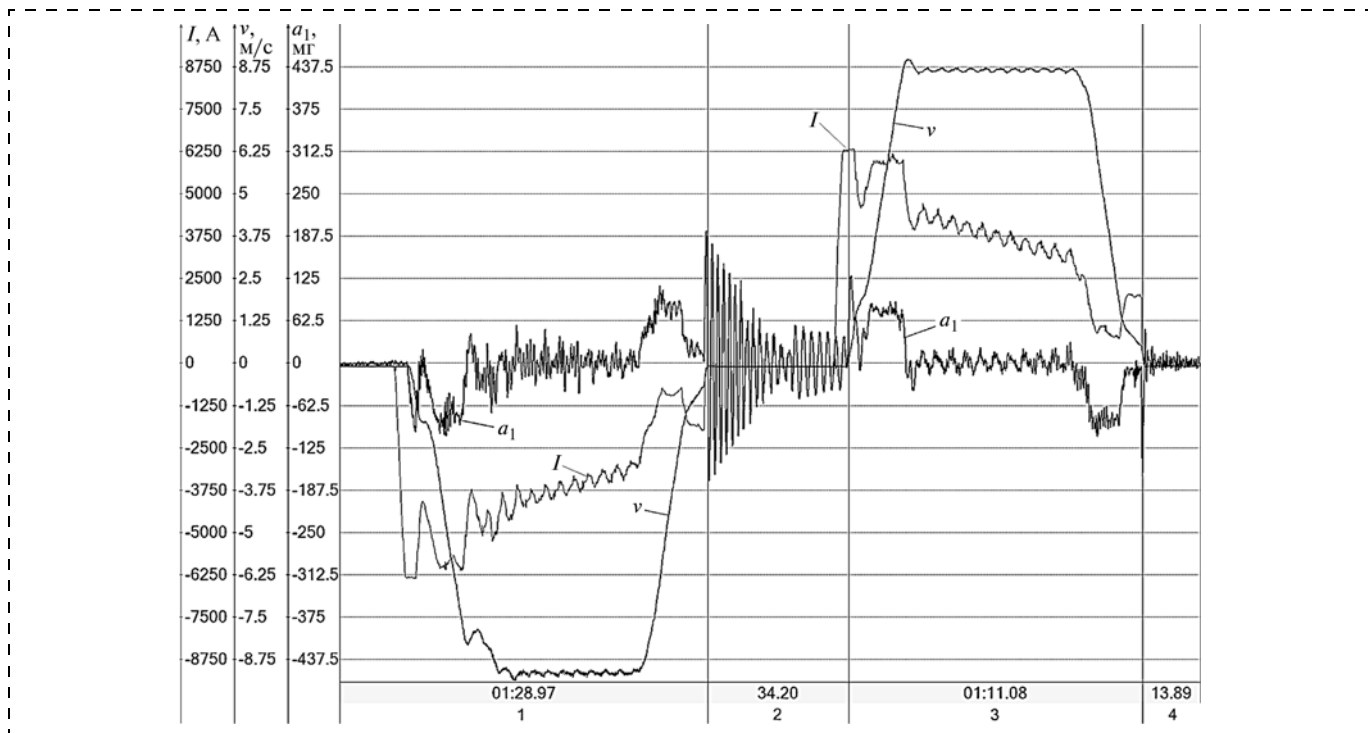


Рис. 1. Графики параметров работы подъемной установки:

$I$  — ток якоря двигателя, А;  $v$  — скорость движения скипа, м/с;  $a_1$  — вертикальное ускорение подъемного сосуда,  $mg$

установки получен массив данных об ускорениях сосуда. Для анализа нагрузок на канат рассмотрены графики вертикальных ускорений, действующих в продольном направлении к канату.

Измерения проведены на подъемных установках калийных рудников. После обработки информации получены графики движения подъемных сосудов. На рис. 1 представлена диаграмма движения одного из скипов, совмещенная с информацией о подъеме, полученной с регистраторов параметров. Представленные ускорения имеют единицу измерения  $mg$ . Это обусловлено типом применяемых датчиков.  $1 mg = 1 g \cdot 10^{-3} = 9,81 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2$ .

На графике изображен цикл работы подъемной установки: 1 — спуск скипа; 2 — загрузка; 3 — подъем груженого скипа; 4 — разгрузка.

Из рис. 1 следует, что на разных этапах цикла движения скипа канат претерпевает воздействие различных по амплитуде динамических нагрузок, т. е. испытывает нерегулярное воздействие. Данный вид нагрузки характерен для всех циклов работы подъемной установки, что влияет на долговечность каната. Амплитуда изменения напряжений в канате на этапе спуска порожнего сосуда за счет меньшей массы концевго груза сравнима или выше по величине по сравнению с амплитудой напряжений при подъеме груза. Однако статическая составляющая нагружения подъемного ка-

ната при спуске порожнего сосуда приблизительно в 2 раза меньше статического нагружения при подъеме груза, поэтому динамические процессы при спуске порожнего сосуда не оказывают существенного влияния на долговечность каната. Динамические нагрузки при подъеме груженого сосуда воздействуют при максимальном натяжении каната, и именно их следует учитывать при исследовании режима работы подъемной установки, как имеющие наибольшее влияние на долговечность каната [2].

Рассматривая графики, приведенные на рис. 1, необходимо отметить, что разные этапы подъема сосуда имеют свои характерные колебания скипа на канате и должны рассматриваться отдельно.

С учетом вышеизложенного методика анализа графиков движения скипа включает следующие этапы:

- выделение циклов подъема груза и разделение их на характерные этапы движения скипа;
- определение максимальных и минимальных пиковых значений ускорений ( $a_{\max}$ ,  $a_{\min}$ ) и расчет усредненных параметров, характеризующих колебательное движение скипа;
- расчет параметра, характеризующего влияние данного режима работы подъемной установки на долговечность каната.

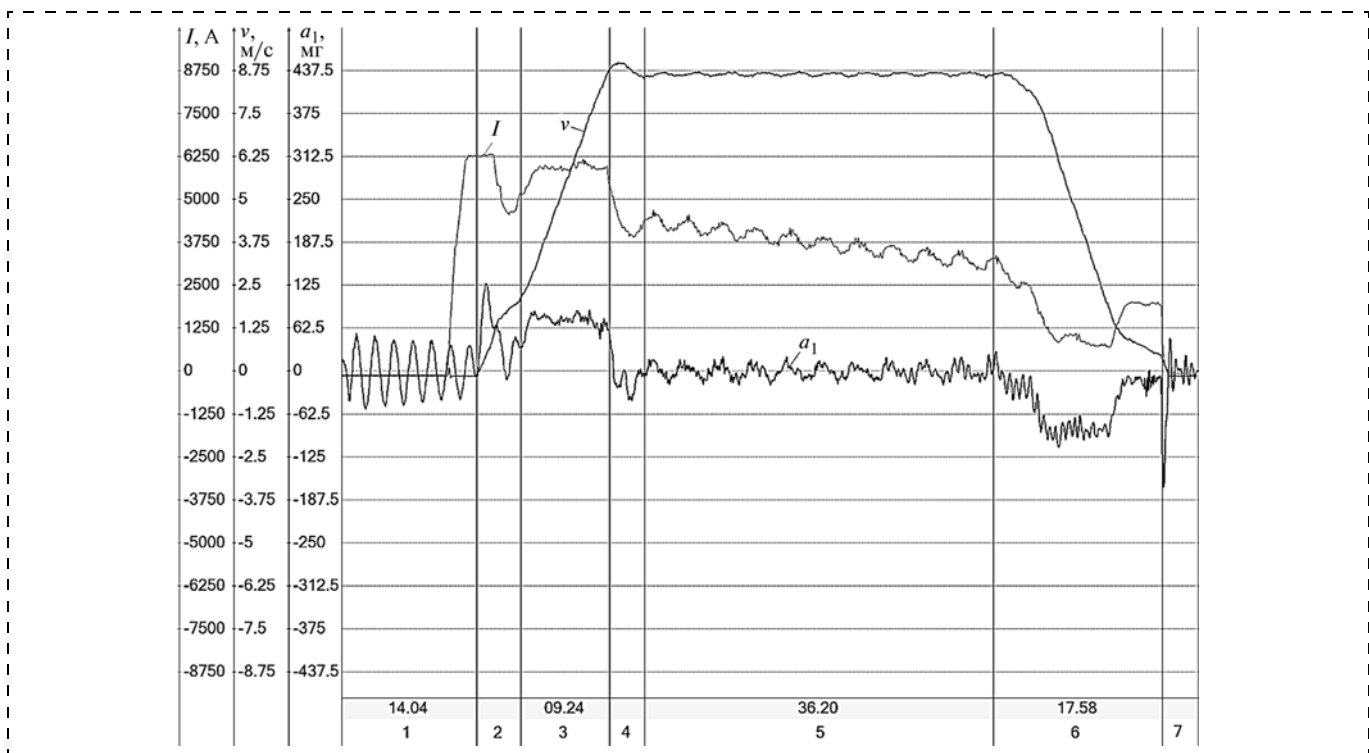


Рис. 2. Графики параметров работы подъемной установки при подъеме грузеного скипа

Цикл подъема грузеного скипа исследуемой подъемной установки был разделен на семь характерных периодов работы (рис. 2 и табл. 1).

Подъемный цикл разделен на периоды с учетом амплитуды колебаний скипа и этапом работы подъемной машины. Колебательное движение скипа описывается средним ускорением  $a_{ms}$  и амплитудой колебаний  $a_a$  по формулам [3]

$$a_{ms} = \frac{a_{\max} + a_{\min}}{2}; a_a = \frac{a_{\max} - a_{\min}}{2}.$$

Среднее ускорение характеризуется изменением скорости, заданным подъемной машиной скипу (кинематические параметры). Оно отражает идеальный режим работы подъемной установки и определяет основные динамические нагрузки, испытываемые канатом.

Таблица 1  
Расчетные параметры колебательного движения скипа в вертикальном направлении

Период	Период подъема скипа	$a_{ms}$ , м/с <sup>2</sup>	$a_a$ , м/с <sup>2</sup>
1	Загрузка скипа рудой	0,06	0,57
2	Трогание подъемной машины	1,00	0,35
3	Основной разгон	0,86	0,06
4	Перерегулирование скорости	-0,13	0,20
5	Равномерное движение скипа	0,05	0,18
6	Замедление	-0,84	0,15
7	Остановка подъемной машины	-1,11	0,48

Амплитуда колебаний скипа характеризует отклонение ускорения скипа за период от его среднего (заданного) значения.

Результаты расчета средних ускорений и амплитуд колебаний исследуемого цикла приведены в табл. 1.

По результатам расчета видно, что при данных кинематических параметрах и оборудовании подъемной установки наибольшие амплитуды колебаний возникают на периодах загрузки скипа рудой, трогания и остановки подъемной машины.

Для оценки влияния данного режима работы подъемной установки на долговечность каната авторами была разработана методика расчета коэффициента снижения долговечности каната [2].

Расчет выполнен по формуле

$$k_{сн} = \frac{A_p \sum v_i}{\sum \frac{v_i}{\alpha(\sigma_{ai})}},$$

где  $A_p$  — сумма относительных долговечностей\*;  $v_i$  — число амплитуд нагружения каждой из динамических нагрузок;  $\alpha(\sigma_{ai})$  — коэффициент сниже-

\* В источнике [2] для обозначения суммы относительных долговечностей использован символ  $A_p$ . Поскольку в данной статье символ  $a$  обозначает ускорение, редакция сочла возможным произвести указанную замену (прим. ред.).

ния долговечности каната при переменных растягивающих нагрузках;  $\sigma_{ai}$  — амплитуда изменения напряжений при каждой динамической нагрузке.

Коэффициент  $k_{сн}$  показывает степень уменьшения долговечности каната в количестве подъемных циклов при воздействии динамических нагрузок по сравнению с долговечностью каната, которая соответствует упрощенному режиму нагружения в виде растяжения—сжатия без возникновения дополнительных динамических нагрузок.

Результаты расчета приведены в табл. 2.

Следует отметить, что коэффициент снижения долговечности рассчитывается для конкретного нагрузочного цикла, заданного параметрами нагрузки каната. Для данного вида динамического нагружения каната этими параметрами являются количество и величина пиковых значений ускорений при колебании скипа. Для любого изменения нагрузочного цикла коэффициент снижения долговечности должен быть определен заново. Таким образом, сложение коэффициентов снижения долговечности, определенных для различных периодов работы подъемной установки, недопустимо.

Из табл. 2 видно, что большое влияние на долговечность каната также оказывается в периоды загрузки скипа рудой, трогания и остановки подъемной машины. Динамические явления, возникающие в эти периоды подъема, могут снижать долговечность каната в среднем на 26...38 %.

Учитывая, что в различные периоды работы подъемной установки имеют свои характерные колебания, то причины их возникновения различны и должны рассматриваться отдельно на каждом из этих периодов подъема:

1. Загрузка руды осуществляется на весу, т. е. скип при загрузке свободно висит на канате. Колебательный процесс при этом складывается из свободных колебаний порожнего скипа после остановки машины и вынужденных колебаний при

загрузке сосуда из-за изменения его массы за короткий промежуток времени. Динамические усилия в канате при загрузке скипа зависят от ее продолжительности, величины и характера пульсации потока загружаемой руды. В основном эти параметры определяются конструктивными особенностями нагрузочного устройства — бункера-дозатора.

2. Предшествующий троганию скипа процесс пуска привода происходит при наложенном на подъемную машину тормозе. Так как привод большинства тормозов не синхронизирован с подъемным двигателем, то двигатель всегда запускается раньше, чем растормаживается машина. Это приводит к дополнительному увеличению тока двигателя и значительному рывку в момент трогания подъемной машины.

3. Стопорение барабана подъемной машины при остановке скипа также сопровождается большим замедлением и значительным рывком. После стопорения подъемной машины под действием сил инерции скип продолжает двигаться вверх, что приводит к возникновению колебаний скипа на упругом канате, характерных для процесса остановки.

Установлено, что дополнительные динамические нагрузки возникают в момент перехода от разгона скипа к равномерному движению. Иногда этот процесс сопровождается перерегулированием скорости. Хотя сам период перерегулирования не вызывает большого снижения долговечности каната (см. табл. 2), воздействие при резком переходе от ускоренного движения скипа со средним значением ускорения  $0,80 \text{ м/с}^2$  к равномерному может сопровождаться критическим изменением напряжения в канате и возникновением колебаний скипа. Перерегулирование скорости обусловлено особенностью наладки подъемной машины.

Таким образом, эксплуатация и внедрение современных систем и средств контроля параметров работы подъемной установки обеспечивают получение необходимой информации для оценки фактического режима работы элементов подъема. В результате анализа полученных экспериментальных данных сделаны следующие выводы о воздействии динамических нагрузок на канат:

1. Большое влияние на появление дополнительных динамических нагрузок на канат оказывается при загрузке скипа рудой, трогании и остановке подъемной машины. Процессы характеризуются большими величинами рывков и ускорений, возбуждая амплитуды колебаний скипа до  $0,57 \text{ м/с}^2$ .

2. Воздействие переменных динамических нагрузок в сравнении с режимом нагружения без до-

Таблица 2

Снижение долговечности каната на каждом этапе работы подъемной установки

Период	Период движения подъемного сосуда	$k_{сн}$
1	Загрузка скипа рудой	0,316
2	Трогание подъемной машины	0,262
3	Основной разгон	0,208
4	Перерегулирование скорости	0,210
5	Равномерное движение скипа	0,174
6	Замедление	0,148
7	Остановка подъемной машины	0,380



полнительных колебаний подъемного сосуда снижает долговечность каната до 38 %.

3. Разработка мер для снижения динамических воздействий в подъемной системе позволит повысить долговечность подъемных канатов.

#### Список литературы

1. Ильин С. Р., Трифанов Г. Д., Воробель С. В. Комплексные экспериментальные исследования динамики

скипов рудоподъемного ствола // Горное оборудование и электромеханика. 2011. № 5. С. 30–35.

2. Трифанов Г. Д., Стрелков М. А. Оценка влияния предохранительного торможения на состояние стального каната шахтной подъемной установки // Горное оборудование и электромеханика. 2012. № 11. С. 26–32.

3. Когаев В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени / под ред. А. П. Гусенкова. 2-е изд., М.: Машиностроение, 1993. 364 с.

G. D. Trifanov, Associate Professor, V. Yu. Zverev, Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University, M. A. Strelkov, Software Engineer, Regional'nyj kanatnyj centr, Perm, Russia

## The Experimental Research of Mining Hoist Plant Operation Mode Influence on Dynamic Loads in the Wire Rope

*The experimental research results of a hoist plant operation mode are described in the paper. The obtained data were analyzed, conclusions about dynamic loads impact on the wire rope at different stages of skip lifting are determined. The dynamic loads reasons are described. The dynamic loads influence on wire rope durability is estimated.*

**Keywords:** mining hoist plant, skip, wire rope, dynamic loads, durability, operation mode

#### References

1. Il'in S. R., Trifanov G. D., Vorobel' S. V. *Kompleksnye jeksperimental'nye issledovanija dinamiki skipov rudopodjornogo stvola. Gornoe Oborudovanie i Elektromehanika*. Moscow, 2011, no. 5, pp. 30–35 (in Russian).

2. Trifanov G. D., Strelkov M. A. *Ocenka vlijanija predohranitel'nogo tormozhenija na sostojanie stal'nogo kanata shahtnoj podjomnoj ustanovki. Gornoe Oborudovanie i Elektromehanika*. Moscow, 2012, no. 11. pp. 26–32 (in Russian).

3. Kogaev V. P. *Raschety na prochnost' pri naprjazhenijah, peremennyh vo vremeni*, pod red. A. P. Gusenkova. 2-e izd., Moscow, Mashinostroenie, 1993, 364 p. (in Russian).

## Информация

Сообщаем, что на сайте ВАК РФ размещена информация о том, что журнал рекомендован к включению в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в соответствии с требованиями приказа Минобрнауки России от 25 июля 2014 г. № 793, с изменениями, внесенными приказом Минобрнауки России от 03 июня 2015 г. № 560 по отрасли науки 25.00.00 – науки о Земле и группам специальностей научных работников: 05.02.00 – машиностроение и машиноведение; 05.05.00 – транспортное, горное и строительное машиностроение; 05.09.00 – электротехника; 05.13.00 – информатика, вычислительная техника и управление.

УДК 621.879:622.271.4

**В. Ю. Сергеев**, канд. техн. наук, ген. директор, Тяжмашсервис, г. Красноярск

E-mail: office@tmsmining.ru

## Технология и экономика сервисного обслуживания как части стоимости владения горного оборудования

---

*Рассмотрена новая технология проведения сервисного обслуживания карьерных и шагающих экскаваторов с использованием современных методов технической диагностики и портативного станочного оборудования, доказывающая преимущество перед классическим методом системы планово-предупредительных ремонтов.*

**Ключевые слова:** карьерные и шагающие экскаваторы, техническая готовность, фирменное сервисное обслуживание, экономика ремонтов

Основу современного парка горного оборудования (карьерные и шагающие экскаваторы) в большинстве угольных и горных предприятий России до сих пор составляют экскаваторы, выпущенные заводами Российской Федерации и Украины в 1990-х и 2000-х гг. Эти экскаваторы имеют значительный моральный и технический износ, в связи с чем мероприятия по поддержанию их технического состояния на должном уровне становятся технически более сложными, а экономически — более дорогими. Общепринятая на сегодняшний день стратегия технического обслуживания основана на системе планово-предупредительных ремонтов (ППР), которая разрабатывалась в 1960-х—1970-х гг. и предусматривала совершенно иной начальный технический уровень обслуживаемых экскаваторов, т. е. подразумевалось, что они (экскаваторы) — фактически новые. Наряду с очевидными преимуществами (плановость, системность, цикличность) система ППР имеет ряд существенных недостатков.

Основные недостатки системы ППР — "слепое", т. е. по прогнозирующему принципу составление дефектных ведомостей, которые часто приходилось фрагментарно корректировать уже по ходу ремонта, долгосрочная и весьма затратная материально-техническая подготовка предстоящего среднего или капитального ремонта, продолжительный по времени сам ремонт. Главный же недостаток — невозможность гарантировать высокий уровень технической готовности экскаватора ввиду отсутствия возможности своевременно устранить

причины аварийных поломок и связанных с этим внеплановых простоев. Существующая практика проведения капитальных ремонтов заключается, как правило, в замене только самых наиболее изношенных деталей и узлов. Обычно из трех вертикально-поворотных валов опорно-поворотного устройства заменялся один, реже два вала. В результате, в дальнейшей эксплуатации замененная новая деталь, имея повышенную нагрузку, очень быстро сравнивается по степени износа с деталями, которые не были заменены. Еще одним недостатком существующей тактики проведения ТОиР по системе ППР является отсутствие инструментального мониторинга текущего технического состояния эксплуатируемого экскаватора по отдельным узлам и механизмам и вытекающая из этого невозможность на более ранней стадии предупредить надвигающиеся риски аварийных отказов.

Созданное в 1990 г. на базе цеха внешнего монтажа и технического обслуживания ПО "Крастьямаш" сервисное предприятие "Тяжмашсервис" (г. Красноярск), убедившись в своей работе в указанных недостатках системы ППР, разработало собственную технологию проведения работ по поддержанию технического состояния изношенных экскаваторов (систему фирменного сервисного обслуживания — ФСО), основанную на современных диагностических методах неразрушающего контроля и новых технологий проведения ремонтных работ с использованием современного портативного наплавочного и механообрабатывающего оборудования.

Основной принцип системы ФСО — обеспечение гарантированного неснижаемого уровня технической готовности обслуживаемого горного оборудования (по коэффициенту готовности) с минимальными экономическими затратами. Выполнение задач по поддержанию уровня технической готовности достигается совершенно иным, нежели при ППР, подходом к подготовке и проведению ремонтных воздействий. Каждый экскаватор при его обслуживании по системе ФСО подвергается непрерывному по времени его эксплуатации техническому мониторингу с использованием современных оперативных средств диагностического контроля.

Задача диагностического оперативного обследования — предотвращение внезапных остановок экскаватора по причине поломок деталей, узлов и механизмов и подготовка его к проведению ежегодного корректирующего (восстанавливающего) ремонта. Эта задача решается тремя этапами осмотров: еженедельный общий с использованием приборов визуально-инструментального контроля; ежемесячное освидетельствование, когда кроме визуально-инструментального применяется тепловизионное обследование электрических цепей, машин и редукторов, и предремонтное годовое обследование, в течение которого, кроме перечисленных видов диагностики, применяется вибрационный контроль, а также ультразвуковая диагностика (УЗД).

Сам годовой корректирующий ремонт проводится с применением агрегатно-узлового метода: основные механизмы ремонтируются заранее отдельно от экскаватора и поступают для замены на находящийся в ремонте экскаватор из обменного фонда (так называемый "обезличенный" ремонт). Основные металлоконструкции и корпусные детали, имеющие большую единичную массу и габариты, подвергаются ремонту на самом экскаваторе с использованием современных портативных наплавочно-токарных, фрезерных и сверлильных станков.

*Тепловизионный метод* контроля позволяет в режиме реального времени провести контроль теплового состояния эксплуатирующегося экскаватора и его основных узлов и механизмов.

На рис. 1 (см. 3-ю стр. обложки) показана тепловая картина работающего экскаватора, снятая при помощи тепловизора. Хорошо видны зоны нагрева элементов лебедок — напора и подъема, а также четырехмашинного преобразовательного агрегата.

Тепловой метод позволяет также провести локальный контроль, например, контактных соединений в силовых электрических цепях (рис. 2, см. 3-ю стр. обложки).

По явному перегреву контактных зон можно диагностировать, например, ослабление затяжки контактов, и как следствие — опасность либо короткого замыкания, либо выхода из строя подключенных электрических установок.

Тепловой контроль наиболее широко применяется при мониторинге технического состояния подшипниковых опор редукторов и электрических машин. Помимо однократного съема тепловой картины этих узлов тепловизор незаменим для фиксации развития степени нагрева подшипников последовательными замерами изменений его температуры при работе, что позволяет сделать своевременный вывод о возможном выходе его из строя.

На рис. 3 (см. 3-ю стр. обложки) показана тепловая картина изменения температуры подшипника быстроходного вала лебедки напора экскаватора ЭКГ-12,5. Отмечено увеличение его температуры с 22 до 38 °С через 5 смен, а еще через 5 смен — до уже критического нагрева — 54 °С. Такая картина изменения его нагрева явилась следствием плохого технического состояния.

*Вибрационный контроль* — основной вид контроля, используемого при непрерывном мониторинге основных узлов и механизмов экскаватора. Современные виброанализаторы позволяют в течение короткого времени (2...3 ч) снять вибрационную картину состояния всех опор основных механизмов экскаватора. На рис. 4 (см. 4-ю стр. обложки) приведены схемы четырехмашинного агрегата экскаватора ЭКГ-10 и таблица результатов замера вибропараметров состояния его подшипниковых опор. Замерялись эффективное среднеквадратичное значение виброскорости  $v_e$  (мм/с) и виброускорения  $a$  (м/с<sup>2</sup>), а также пиковое значение виброперемещения  $S_p$  каждой опоры в трех плоскостях. В результате сравнения с табличными значениями граничных величин этих параметров выделены проблемные (желтый цвет) и критические (красный цвет) зоны опор агрегата. Таким же образом контролируется состояние лебедки подъема, напора, редуктора поворота и хода.

*Годовой корректирующий ремонт* является основным ремонтным воздействием системы ФСО. При подготовке проведения этого ремонта учитываются полученные ранее данные диагностического мониторинга, предварительно определяются узлы и механизмы, а также силовые металлоконструк-

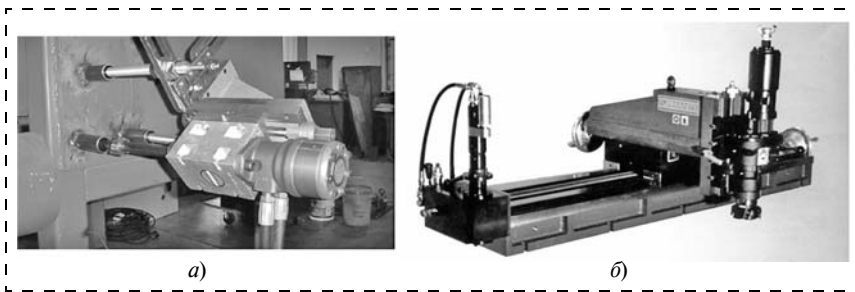


Рис. 5. Портативное механообрабатывающее оборудование: а — сверлильный станок; б — фрезерный станок

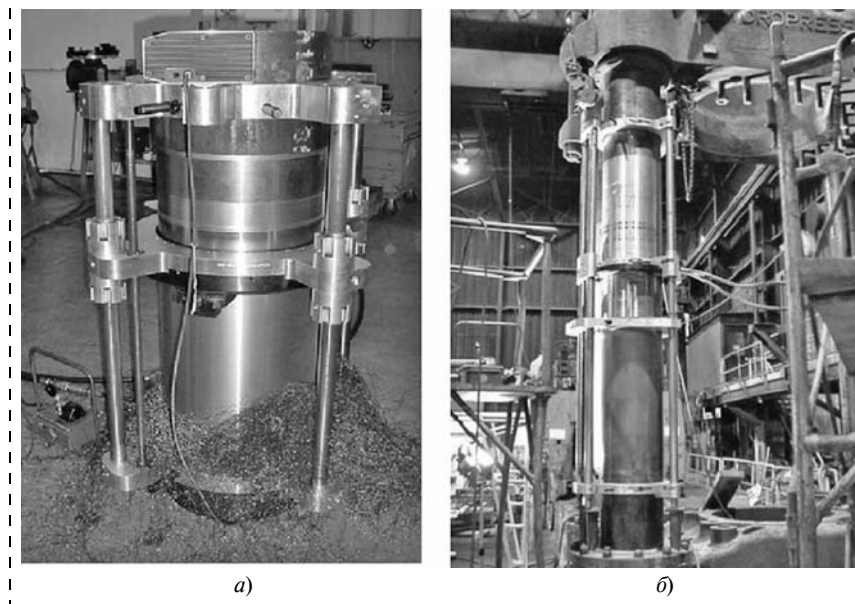


Рис. 6. Примеры применения расточного оборудования при восстановлении цилиндрических поверхностей центральной цапфы экскаватора ЭШ-10.70 (а) и штока вспомогательного цилиндра механизма шагания экскаватора ЭШ-15.90 (б)

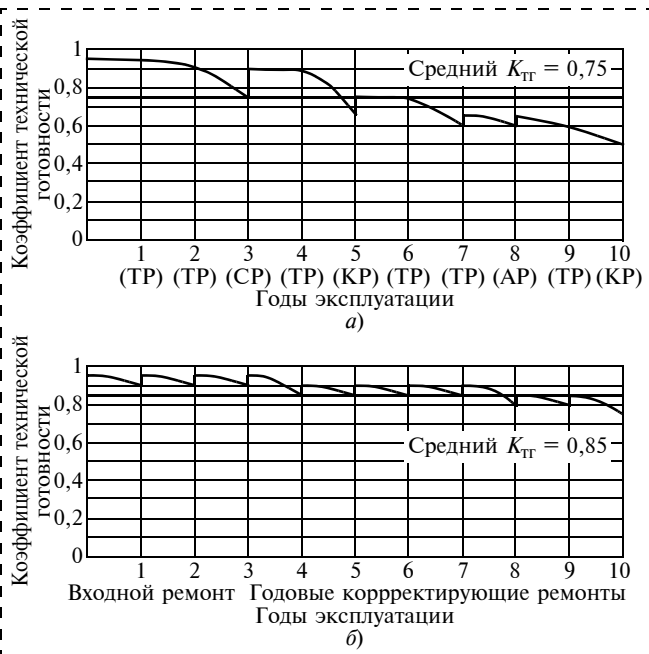


Рис. 7. Изменение уровня технической готовности экскаваторов ЭКГ-10 при обслуживании их по системам ППР (а) и ФСО (б)

ции, которые подлежат восстановлению во время этого ремонта. Сам ремонт проводится с использованием портативного технологического оборудования, которое позволяет провести восстановление геометрических параметров изношенных участков механизмов экскаватора быстро и с необходимой точностью непосредственно на самом экскаваторе.

На рис. 5 показаны образцы портативных сверлильного и фрезерного станков. Эти станки, наряду с наплавочно-расточным оборудованием, можно разместить практически в любых подлежащих восстановлению местах экскаватора.

На рис. 6 показаны примеры установки такого оборудования при восстановлении цилиндрических поверхностей центральной цапфы экскаватора ЭШ-10.70 и штока вспомогательного цилиндра механизма шагания экскаватора ЭШ-15.90.

Применение агрегатно-узлового метода ремонта с установкой на ремонтируемый экскаватор ранее отставрированных

механизмов из обменного фонда позволяет, наряду с оперативным ремонтом с использованием портативного технологического оборудования, сократить срок проведения всего корректирующего ремонта до 30 календарных дней по механическим лопатам и до 45 дней по шагающим и роторным экскаваторам.

Как известно, затраты на поддержание необходимого уровня технической готовности экскаватора, наряду со стоимостью его приобретения, являются основными статьями стоимости владения этого экскаватора. При принятии решения о приобретении нового либо ранее восстановленного экскаватора учитываются такие факторы, как предполагаемый срок его эксплуатации, реальная производительность и себестоимость единицы добытого при его помощи полезного ископаемого. Затраты на эксплуатацию экскаватора, куда входят затраты на его обслуживание, напрямую влияют на себестоимость добытого полезного ископаемого

и поэтому являются очень важным фактором при выборе стратегии сервисного обслуживания. Доля таких затрат доходит до 80 % от уровня всех общих затрат на эксплуатацию экскаватора и до 40...45 % в себестоимости добычи единицы полезного ископаемого.

На рис. 7 приведены графики изменения коэффициента технической готовности в течение срока эксплуатации экскаваторов ЭКГ-10, которые обслуживались как по системе ППР, так и по системе ФСО на одном из горных предприятий.

Экскаватор (новый, после монтажа), обслуживаемый по системе ППР, прошел 10-летний ремонтный цикл с двумя капитальными, двумя средними и одним аварийным ремонтом (совмещенным со вторым капитальным ремонтом). Значение  $K_{ТГ}$ , равное 0,95, после ввода экскаватора в эксплуатацию плавно снижалось в течение 1-го и 2-го годов, и к 3-му году уже достигло значения 0,75. После проведения планового среднего ремонта его техническая готовность была восстановлена до значения 0,9, но к 5-му году его уровень снизился до значения 0,65. После нового восстановления уровня технической готовности, при проведении очередного капитального ремонта коэффициент  $K_{ТГ}$  после непродолжительной стабилизации на 6-м и 7-м годах эксплуатации начал

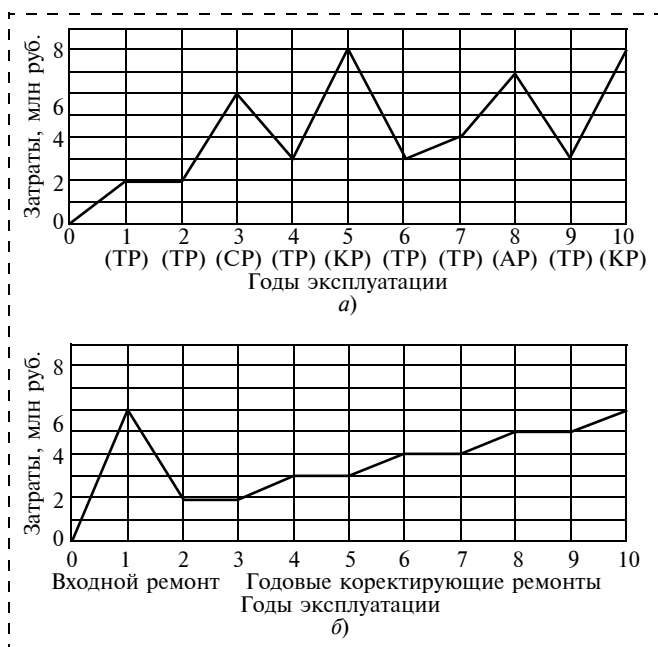


Рис. 8. Динамика изменения уровня затрат при проведении обслуживания экскаваторов ЭКГ-10 по системам ППР (а) и ФСО (б)

опять круто снижаться (8...10-й годы) и достиг крайне низкого значения 0,5. В результате, общее среднее значение  $K_{ТГ}$  за 10-летний срок эксплуатации не превысило 0,75.

Экскаватор (ранее бывший в эксплуатации и капитально отремонтированный), обслуживавшийся по системе ФСО, за счет недопущения аварийных ситуаций и связанных с этим внеплановых простоев в результате проведения непрерывного диагностического мониторинга и ежегодных корректирующих ремонтов имел близкую к линейной характеристику изменения  $K_{ТГ}$  со средним его значением за такой же период эксплуатации 0,85.

На рис. 8 приведены сравнительные экономические показатели затрат на проведение сервисного обслуживания экскаваторов ЭКГ-10 за 10 лет эксплуатации.

Затраты при проведении обслуживания по системе ППР имеют переменный и трудно прогнозируемый характер, что связано со значительной разницей годовых затрат при проведении капитальных и средних ремонтов (а также в случае необходимости и аварийных) и текущих годовых ремонтов. За 10 лет они составили 40 млн руб.

Затраты при проведении ФСО имеют более равномерный характер, они предсказуемо планируются по сроку проведения и прогнозируются по реальной величине. Общие затраты при проведении ФСО ниже затрат на проведение ППР за весь 10-летний цикл наблюдений (40 млн руб.). Фактически экономия достигается за счет устранения причин аварийных простоев (и связанных с ними дополнительных затрат), а также за счет применения более прогрессивной технологии ремонта, уменьшающей себестоимость и общий срок проведения всех ремонтных работ.

#### Список литературы

1. Сергеев В. Ю. Оценка эффективности внедрения системы ФСО (фирменного сервисного обслуживания) горного оборудования как долгосрочного инвестиционного проекта // Горная промышленность. 2010. № 1. С. 43—45.
2. Сергеев В. Ю. Зависимость технической готовности одноковшовых экскаваторов и затрат на их техническое обслуживание от выбора тактики проведения планово-предупредительных ремонтов // Горное оборудование и электромеханика. 2012. № 10. С. 20—23.
3. Подэрни Р. Ю. Механическое оборудование карьеров: учеб. для вузов, 8-е изд. М.: Майнинг Медиа Групп, 2013. 593 с.

## Technology and Economy of Service as Part of the Cost of Ownership of Mining Equipment

*A new technology of power shovels and walking draglines service by using modern methods of technical diagnostics and the portable machine tools, proving an advantage over the classical method of preventative maintenance.*

**Keywords:** power shovels and walking draglines, technical readiness, business service, repair the economy

### References

1. **Sergeev V. Yu.** *Ocenka ehffektivnosti vnedreniya sistemy FSO (firmennogo servisnogo obsluzhivaniya) gornogo oborudovaniya kak dolgosrochnogo investicionnogo proekta*, Moscow, *Gornaya Promyshlennost'*, 2010, no. 1, pp. 43—45 (in Russian).

2. **Sergeev V. Yu.** *Zavisimost' tekhnicheskoy gotovnosti odnokovshovyh ehkskavatorov i zatrat na ih tekhnicheskoe obslu-*

*zhivanie ot vybora taktiki provedeniya planovo-predupreditel'nyh remontov*, Moscow, *Gornoe Oborudovanie i Ehlektromekhanika*, 2012, no. 10, pp. 20—23 (in Russian).

3. **Poderni R. Yu.** *Mechanicheskoe oborudovanie karierov*, Ucheb. dla vusov. 8-th edi., Moscow, Majning Media Grupp, 2013. 593 p. (in Russian).

УДК 621.785.5

**В. А. Коротков**, д-р техн. наук, проф., НТИ (ф) УрФУ, г. Нижний Тагил

E-mail: vk@udgz.ru

## Сокращение частоты ремонтов и ремонтных затрат применением плазменной закалки и карбонитрации

*Изложены результаты лабораторных испытаний сталей с различными видами упрочнения. Показано, что плазменная закалка и карбонитрация более эффективно снижают износ, чем объемная закалка с высоким отпускком легированных сталей (улучшение). Это многократно продлевает срок службы деталей, уменьшает частоту ремонтов и ремонтные расходы, увеличивает фонд рабочего времени оборудования с одновременным сокращением закупки легированных сталей для запчастей.*

**Ключевые слова:** плазменная закалка, карбонитрация, износостойкость

### Введение

Для надлежащей жесткости обычно деталям придают относительно большие сечения. Напряжения от рабочих нагрузок в них не достигают высоких значений, поэтому большая часть деталей машин по условию прочности (предупреждения поломок от статических нагрузок) могла бы изготавливаться из недорогостоящих низкоуглеродистых сталей типа 15, 20, 30 с твердостью в нормализованном (горячекатаном) состоянии НВ 140...160. Но в сопряжениях, в силу небольшой площади контактов, напряжения превышают средние напряжения, действующие в сечениях деталей, что приводит к смятию или быстрому износу. Для предотвращения этого контактные поверхности рекомендуется [1] подвергать поверхностному упрочнению (закалке ТВЧ, цементации, гальваническому хромированию, азотированию,

наплавке, напылению и пр.), что не всегда возможно по конструкторским, технологическим и организационным причинам. Поэтому вместо локального упрочнения для изготовления деталей используют более прочные марки среднеуглеродистых сталей (45, 50, 60) с твердостью НВ 180...200 в "нормализованном" состоянии. Если этого не достаточно, то применяют легированные конструкционные стали типа 40Х, 30ХГСА, 38ХС с твердостью НВ 220...240 — в нормализованном состоянии и НВ 260...300 — в "улучшенном" (после объемной закалки и высокого отпуска). Однако если принять во внимание, что в результате поверхностного упрочнения (закалка ТВЧ, цементация и пр.) твердость возрастает до НВ 500...600, то перечисленные меры повышения контактной прочности и износостойкости не выглядят эффективными.

Проведение локального упрочнения контактных поверхностей стало более доступным с разработкой ручной плазменной закалки и карбонитрации. Плазменная закалка осуществляется перемещением плазменной дуги по поверхности изделия. Она получила известность в 1980-х—1990-х гг., но то ее применение можно охарактеризовать как эпизодическое. Специализированные установки для плазменной закалки не выпускались, поэтому ее разработчики одновременно занимались адаптацией плазменных установок другого рода (для напыления, сварки, резки) к процессу поверхностной закалки. Этот недостаток был преодолен в 2002 г., когда в ООО "Композит" (г. Н. Тагил) была разработана специализированная установка ручной плазменной закалки УДГЗ-200. С помощью ее стало удобно закалывать то, что было недоступно или трудно осуществимо [2].

Карбонитрация — разновидность азотирования [3], перед которым у карбонитрации имеются преимущества: 1) не требуется столь тщательной очистки деталей перед обработкой; 2) сам процесс карбонитрации многократно короче (~3 ч по сравнению с ~50 ч).

Целью настоящей работы является изучение износостойкости сталей, упрочненных плазменной закалкой и карбонитрацией, в производственных и лабораторных условиях.

### Испытания на машине трения

Испытания на машине трения МИ-1М проводились без смазки по схеме "диск—колодка", в пять этапов по 5 мин с нагрузкой 20 кг на первых четырех этапах и с нагрузкой 30 кг на последнем этапе; частота вращения диска  $425 \text{ мин}^{-1}$ . В каждом сочетании материалов испытывалось по три пары образцов, для сравнения использовались средние значения. После каждого этапа образцы взвешивались и определялся их весовой износ. Во всех случаях колодка была из нормализованной стали 45. Карбонитрация дисков проводилась в течение 2 ч в расплаве цианата калия при температуре  $570 \text{ }^\circ\text{C}$  с активацией расплава согласно [2]. Плазменная закалка дисков выполнялась установкой УДГЗ-200 без оплавления поверхности. Результаты испытаний представлены на рис. 1 и 2.

На рис. 1 видно, что износ нормализованного диска из стали 45 с твердостью НВ 200 происходил наиболее быстро и с постоянной интенсивностью на всех этапах, что говорит об отсутствии приработки этой пары. Диск в улучшенном состоянии (после закалки с высоким отпуском) изнашивался

менее интенсивно. Он замедлил износ после второго этапа испытаний, что говорит о способности данной пары прирабатываться. Применение взамен улучшенной углеродистой стали 45 тоже "улучшенной" легированной стали 30ХГСА дало еще большее снижение износа диска, что оправдывает применение дорогостоящих легированных сталей для увеличения износостойкости. Но плазменная закалка углеродистой стали 45 и ее карбонитрация дали более существенное замедление износа, чем применение легированной стали 30ХГСА в "улучшенном" состоянии. При этом во всех случаях увеличение нагрузки на последнем этапе не оказало существенного влияния на изнашивание.

На рис. 2 представлены средние значения износа дисков на этапах установившегося изнашивания (2—4). Если принять за базу сравнения износ нормализованной стали 45, то улучшение стали 45 дало замедление износа в 1,4 раза ( $4,01/2,82$ ), а применение легированной стали 30ХГСА в "улучшенном" состоянии — в 4,6 раза ( $4,01/0,88$ ). Более существенно снизили износ плазменная закалка и карбонитрация стали 45: в 10,6 раза

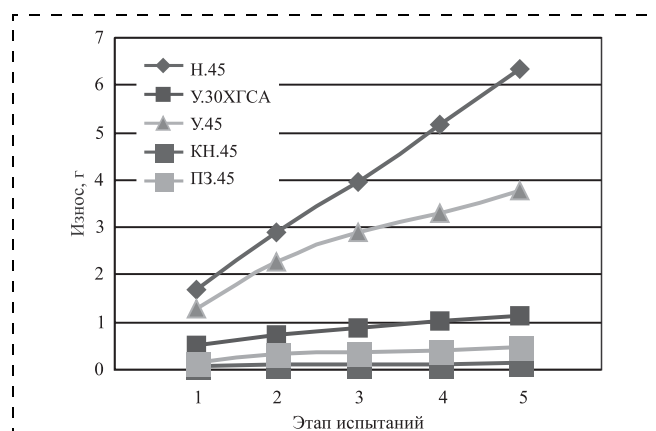


Рис. 1. Износ дисков из сталей 45 в нормализованном (Н), улучшенном (У), а также в состояниях после плазменной закалки (ПЗ) и карбонитрации (КН) на этапах испытаний (для сравнения показан износ легированной стали 30ХГСА в улучшенном состоянии)

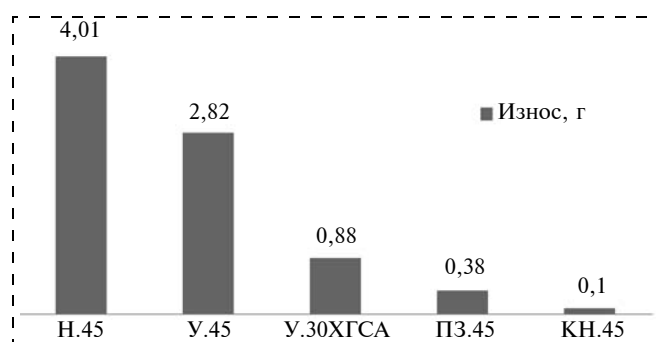


Рис. 2. Средний износ дисков на этапах установившегося изнашивания (2—4). Обозначения те же, что на рис. 1

(4,01/0,38) и 40,1 раза (4,01/0,1) соответственно. Заметим, что эти наилучшие результаты достигнуты без увеличения затрат на основной материал, т. е. без применения легированной стали. Превосходство карбонитрации в износостойкости над плазменной закалкой объясняется образованием в процессе карбонитрации на поверхности деталей особо твердого слоя карбонитрида [2].

### Производственные испытания

Плазменная закалка и карбонитрация, как и большинство методов упрочнения, обладают некоторой взаимозаменяемостью, но вместе с тем у них имеются предпочтительные сферы применения. У плазменной закалки это преимущественно крупногабаритные детали, упрочнение контактных поверхностей которых труднодоступно большинству других способов упрочнения. Карбонитрация осуществляется в ваннах с расплавом соли, размеры которых не могут быть большими, соответственно не могут быть значительными и карбонитрируемые детали. Оба способа могут применяться как финишные, т. е. после чистовой механообработки, когда деталям придали чертежные размеры, что также расширяет область их применения. Кроме того, плазменная закалка может повторяться прямо по месту эксплуатации детали по мере износа закаленного слоя (~1 мм).

Далее рассмотрены примеры применения плазменной закалки и карбонитрации для деталей машин различных областей машиностроения.

*Зубчатый венец барабана окомкователя* (рис. 3) в зацеплении с подвенцовой шестерней служит для передачи вращения барабану в процессе окомкования и увлажнения шихты. Венец (сталь 40ГЛ) поставляется без упрочняющей термообработки,



Рис. 3. Барабан окомкователя с зубчатым венцом

с низкой твердостью HRC 20, так как изготовители не могут выполнить закалку из-за больших габаритов венца, а закалку подвенцовой шестерни (сталь 34ХН1М) в таком случае не производят, чтобы ускоренно не износить более дорогостоящий зубчатый венец. Нарботка до предельного износа зубьев (30 %) составляет: венца — 2 мес, подвенцовой шестерни — 1 мес.

Плазменная закалка зубчатого венца шестерни увеличила твердость зубьев до HRC 50...55. Нарботка до износа закаленного слоя толщиной 1 мм составила: у венца — 8 мес, а у подвенцовой шестерни — 4 мес. Затем, во время плановых профилактических ремонтов на окомкователе, без демонстрации деталей, закалка зубьев повторяется. Трехкратная плазменная закалка в 12 раз продлила срок службы зубчатой пары (венца — до 24 мес, а подвенцовой шестерни — до 12 мес) и тем высвободила из употребления 11 пар.

Экономия от сокращения закупки деталей составляет:

$$\begin{aligned} \Theta &= (1191 \text{ тыс. руб.} \cdot 11) - (207 \text{ тыс. руб.} \cdot 3) = \\ &= 13101 - 621 = 12\,480 \text{ тыс. руб.,} \end{aligned}$$

где 1191 тыс. руб. = 1036 + 155 — стоимость венца и подвенцовой шестерни; 207 тыс. руб. = 183 + 24 — стоимость плазменной закалки венца и подвенцовой шестерни; 11 — число высвободившихся пар (венец и подвенцовая шестерня); 3 — число плазменных закалок.

Кроме того, сократилось число вызовов монтажных бригад и сданных в металл пар венцов и шестерней: вместо 12 их стало 11. Разница при этом составляет

$$\begin{aligned} &(290 \text{ тыс. руб.} \cdot 11) - (57 \cdot 11) = \\ &= 3190 - 627 = 2563 \text{ тыс. руб.,} \end{aligned}$$

где 290 тыс. руб. = 260 + 30 — стоимость монтажа венца и шестерни; 57 тыс. руб. = 52 + 5 — стоимость венца и шестерни как металлолома.

Таким образом, общая экономия: 12 480 + 2563 = 15 043 тыс. руб., при эффективности вложений в плазменную закалку ~24 руб. экономии на 1 руб. затрат (15 043 тыс. руб./621 тыс. руб.).

*Валы-шестерни* (материал — сталь 40Х или 34ХН1М) редуктора перемещения бурового станка СБШ-250 (рис. 4) в цементированном состоянии обрабатывали по 11 мес между плановыми ремонтами. По организационным причинам был сделан переход на упрочнение закалкой ТВЧ, что в 2 раза сократило срок службы и, как следствие, привело к необходимости проведения ремонтов в неблагоприятных условиях карьера. Это обстоятельство и





Рис. 4. Валы-шестерни редуктора перемещения бурового станка СБШ-250 после карбонитрации

Расход валов-шестерен редуктора перемещения бурового станка СБШ-250

Год	2006	2007*	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014**
Число, шт.	38	27	17	5	5	6	5	6	9

\*Начало применения карбонитрированных валов-шестерней.  
 \*\*Введение в эксплуатацию дополнительных станков.

стало главной причиной проведения опытных работ по упрочнению валов-шестерней карбонитрацией, о результатах применения которой можно судить по данным, приведенным в таблице. Сокращение расхода валов-шестерен произошло более чем в 2 раза, что позволяет сделать вывод о преимуществе в данном случае карбонитрации перед цементацией.

На расточных станках для обработки вагонных тележек срок службы пары шестерен ( $\varnothing 84/\varnothing 172$ ) в "улучшенном" состоянии составлял около 2 мес.

Замена их приводила к простоям по 8 ч 6 раз в год. Применение карбонитрации увеличило наработку шестерен до года и помимо сокращения расходов на изготовление шестерен и оплату ремонтных бригад сократило ремонтные простои на участке из 5 станков от 240 ч ( $8 \text{ ч} \cdot 6 \cdot 5$ ) до 40 ч ( $8 \text{ ч} \cdot 1 \cdot 5$ ). То есть высвободило фонд рабочего времени 200 ч, который сопоставим с месячным фондом работы станка в одну смену.

### Заключение

Плазменная закалка и карбонитрация позволяют упрочнять и существенно увеличивать срок службы деталей, которые до этого применялись в неупрочненном состоянии или их упрочнение было не достаточно эффективно. Одновременно с увеличением сроков службы происходит снижение затрат на приобретение запчастей и расходов на их замену, увеличение фонда рабочего времени оборудования. Появляется возможность использовать при изготовлении деталей экономичные углеродистые стали взамен дорогостоящих легированных.

### Список литературы

1. Гаркунов Д. Н. Триботехника. М.: Машиностроение, 1999. 336 с.
2. Коротков В. А. 10 лет применению ручной плазменной закалки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 9. С. 20—24.
3. Прокошкин Д. А. Химико-термическая обработка металлов — карбонитрация. М.: Металлургия, Машиностроение, 1984. 240 с.

V. A. Korotkov, Professor, e-mail: vk@udgz.ru,  
 Nizhny Tagil Institute of Technology (Branch) Ural Federal University, Nizhny Tagil, Russia

## Reduce the Frequency of Repairs and Maintenance Costs Application of Plasma Quenching and Carbonitriding

*The results of laboratory tests of steels with different types of reinforcement. It is shown that plasma hardening and carbonitriding more effective in reducing wear than through hardened and tempered alloy steel (better). This greatly extends the life of the components, reduces the frequency of repairs and maintenance costs, increase working time fund equipment, while reducing the purchase of alloy steels for parts.*

**Keywords:** plasma hardening, carbonitriding, wear resistance

### References

1. Garkunov D. N. *Tribotechnika*. Moscow, Mashinostroenie, 1999, 336 p. (in Russian).
2. Korotkov V. A. *10 let primeneniju ruchnoj plazmennoj zakalki*. Uprochnjajushhie Tehnologii i Pokrytija, 2012, no. 9, pp. 20—24 (in Russian).

3. Prokoshkin D. A. *Himiko-termicheskaia obrabotka metallov — karbonitracija*. Moscow, Metallurgija, Mashinostroenie, 1984, 240 p. (in Russian).

УДК 622.242.082:004.89

**Н. И. Сысоев**, д-р техн. наук, проф., **Н. Н. Буренков**, канд. техн. наук, доц.,  
**Чу Ким Хунг**, асп., ЮРГПУ (НПИ), г. Новочеркасск

E-mail: SysoevNI@npi-tu.ru

## **Выбор рациональных параметров режущей части буровых резцов с помощью метода конечных элементов**

*Предложен метод расчета рациональных параметров режущей части буровых резцов, обеспечивающих требуемую ее прочность и высокую эффективность бурения шпуров. Использован метод конечных элементов, реализованный программным пакетом ANSYS. Применительно к классификации горных пород по контактной прочности, предложенной проф. Л. И. Бароном, выполнена систематизация их физико-механических параметров. Установлена зависимость минимальных значений углов заострения от контактной прочности горных пород.*

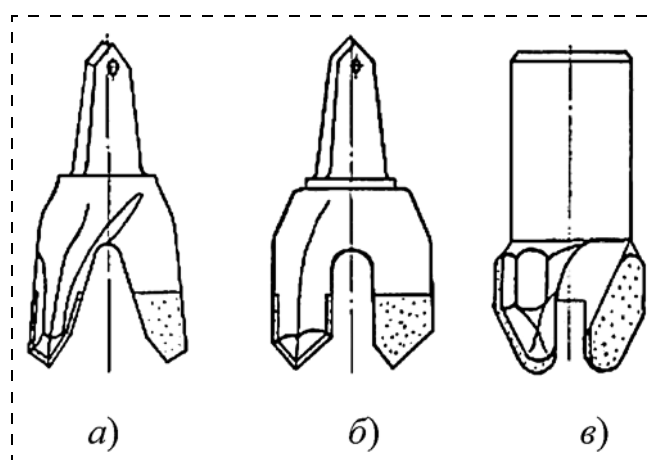
**Ключевые слова:** бурение шпуров, буровой резец, физико-механические параметры породы, классификация горных пород по контактной прочности, прочность режущей части, метод расчета, метод конечных элементов

При буровзрывном способе проведения подготовительных выработок в угольных шахтах и рудниках в настоящее время широко применяется вращательное бурение шпуров. При этом в зависимости от крепости горных пород по шкале проф. М. М. Протодяконова применяют резцы трех типов (рис. 1), условно названные угольными, углепородными и породными [1]. Резцы этих типов различаются в основном диаметром  $d$  раствора и углами  $\delta$  заострения (табл. 1).

Выпускаемые промышленностью буровые резцы этих типов адаптируются для указанных условий применения и другими конструктивными параметрами, главными из которых являются угол резания  $\gamma$ , влияющий на эффективность процесса разрушения забоя шпура, и уже упомянутый угол заострения  $\delta$ , обеспечивающий прочность режущей части. При этом  $\gamma = \delta + \alpha$ . Задний угол  $\alpha$  устанавливается из условия устранения контакта задней поверхности режущей части с поверхностью забоя.

Известно [1], что с уменьшением угла резания скорость бурения шпуров возрастает, но при этом уменьшаются углы заострения, вызывая потерю прочности режущей части. При анализе известных конструкций буровых резцов [1] установлено, что указанные выше параметры были выбраны опытным путем для конкретных условий применения. При этом буримые горные породы были условно

разделены на три группы, а также выявлены границы варьирования этих параметров внутри групп (см. табл. 1).



**Рис. 1. Типы резцов для бурения шпуров:**  
 а — угольный; б — углепородный; в — породный

Таблица 1

**Основные параметры режущей части для характерных типов буровых резцов**

Группа породы	Типы резцов	Угол заострения $\delta$ , °	Диаметр раствора $d$ , мм
Мягкие (уголь, порода с $f \leq 3$ )	Угольные	60...65	20...30
Средней крепости (уголь, порода с $f = 2...6$ )	Углепородные	65...70	8...12
Выше средней крепости (порода с $f = 6...12$ )	Породные	70...90	6...9

Для того чтобы спроектировать режущую часть бурового резца для заданных условий применения необходимо определить внешний диаметр  $D$  и диаметр раствора  $d$  (рис. 2), углы резания и заострения, обеспечивающих высокую скорость бурения и достаточную прочность армирующих вставок. Внешний диаметр  $D$  принимается равным диаметру буримого шпура, т. е. этот параметр стандартизирован. Диаметр раствора  $d$  принимается исходя из крепости и хрупкости породы. Чем порода менее прочная и более хрупкая, тем большие значения этого параметра могут быть приняты. При этом должны обеспечиваться гарантированное разрушение керна и прочность перьев резца.

Для определения углов заострения необходимо разработать метод расчета. В основу метода расчета угла заострения  $\delta$  положена зависимость критического значения этого угла по условию прочности режущей части, характеризуемой допускаемым напряжением, от контактной прочности  $P_k$  в момент выкола крупного элемента при заданных  $h$  и  $\gamma$ . Параметр  $P_k$  выбран в качестве показателя прочности горной породы, так как он имеет более тесную корреляционную связь с величинами нагрузок [1]. При этом значения угла  $\alpha$  и толщины стружки  $h$  принимаются постоянными.

В процессе резания в горной породе создается напряженно-деформированное состояние, при котором возникает уплотненное ядро и начинает развиваться главная трещина, приводящая к выколу элемента стружки. Силы, действующие на режущую часть, вызывают ее напряженно-деформированное состояние и достигают максимальных (пиковых) значений в момент выкола крупного элемента стружки, которое может вызвать ее разрушение. Отсюда следует, что процесс выкола крупного элемента стружки и процесс разрушения режущей части следует рассматривать в динамике их развития, причем за очень короткий промежуток времени.

Для математического моделирования этих процессов был применен метод конечных элементов (МКЭ), реализованный программным пакетом ANSYS, состоящим из двух модулей ANSYS/LS-DYNA и ANSYS/Workbench [2], который, на наш

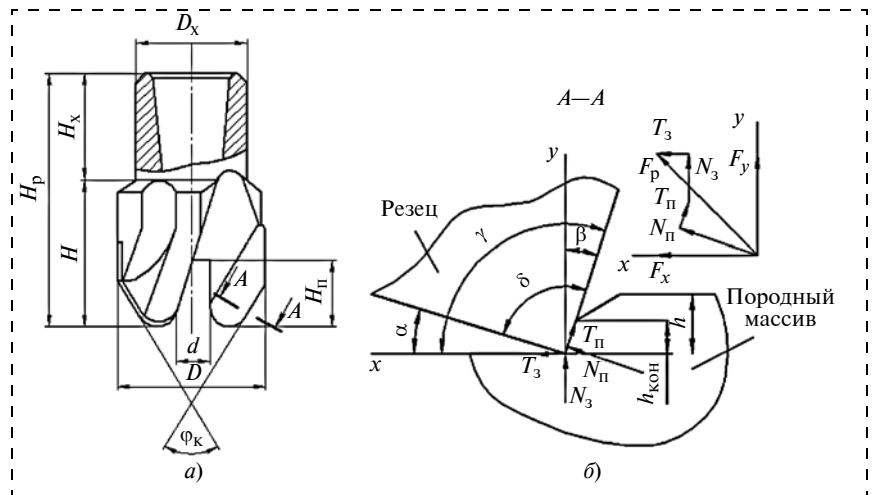


Рис. 2. Конструктивные параметры бурового резца (а) и схема сил, действующих на режущую часть (б):

$D$  — внешний диаметр резца;  $d$  — диаметр раствора;  $D_x$  — диаметр хвостовика;  $H_p$  — длина резца;  $H_x$  — высота хвостовика резца;  $H$  — высота пера;  $H_п$  — глубина паза рассечки;  $\phi_k$  — концевой угол;  $\alpha$  — задний угол;  $\beta$  — передний угол;  $\gamma$  — угол резания;  $\delta$  — угол заострения;  $h$  — толщина стружки;  $h_{кон}$  — высота контакта по передней грани;  $N_п, N_3, T_п$  и  $T_3$  — нормальные и касательные силы, действующие на переднюю и заднюю грани;  $F_p$  — результирующая сила

взгляд, в настоящее время по сравнению с известными более приемлем и апробирован при решении задач механики твердого тела.

Метод расчета рациональных углов заострения предполагает решение следующих задач:

1. Расчет сил, действующих на режущий клин бурового резца в момент выкола крупного элемента стружки при варьировании контактной прочности  $P_k$  и угла заострения  $\delta$ .

2. Расчет максимальных напряжений, возникающих в режущем клине от действующих на нее сил.

3. Установление зависимости минимальных углов заострения  $\delta$  от контактной прочности  $P_k$  при условии равенства максимальных действующих напряжений принятым допускаемым напряжениям.

4. Выбор угла заострения  $\delta$  бурового резца в зависимости от контактной прочности  $P_k$  буримой породы при обеспечении максимально возможной скорости бурения и прочности режущей части.

Для определения сил и напряжений по пп. 1 и 2 расчетная схема (см. рис. 2, б) была представлена плоскими сечениями режущей части и породного массива бесконечно малой толщины, образованной двумя параллельными плоскостями, перпендикулярными к режущей кромке.

При решении первой задачи был использован модуль ANSYS/LS-DYNA, в целях применения которого было выполнено:

- 1) разбиение плоских сечений режущей части и горной породы (рис. 3) на конечные элементы че-

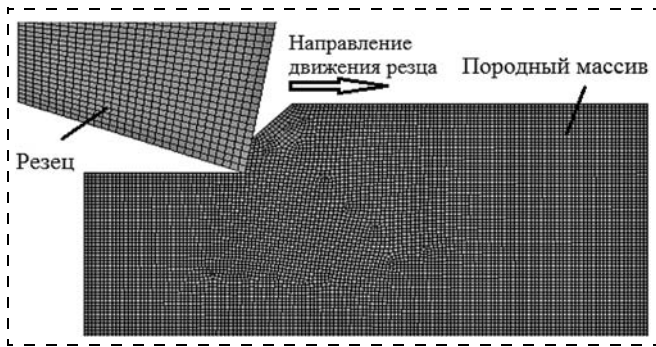


Рис. 3. Конечно-элементная модель для расчетов сил резания горной породы

треугольного вида, рекомендованные для решения задач такого типа [2];

2) установление требуемых для расчетов параметров свойств материала режущей части и породного массива. При этом режущая часть рассматривается как абсолютно жесткое тело с параметрами:  $\rho_p$  — плотность;  $E_p$  — модуль упругости;  $\nu_p$  — коэффициент Пуассона.

При резании в породном массиве возникает сложное напряженное состояние, предшествующее сколу элемента стружки, которое может быть описано упругопластической моделью Друкера—Прагера [2, 3] с использованием следующих физико-механических параметров:  $G$  — модуль сдвига;  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $\rho$  — объемная масса;  $C$  — удельное сцепление;  $\varphi$  — угол внутреннего трения.

Критерий прочности Друкера—Прагера является обобщением закона Кулона—Мора, при котором форма предельной поверхности задается уравнением

$$\sqrt{J_2} + \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sin \varphi}{(3 \pm \sin \varphi)} I_1 - \frac{2\sqrt{3}C \cos \varphi}{(3 \pm \sin \varphi)} = 0,$$

где  $J_2$  — второй инвариант девиаторной части тензора напряжений,  $J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$ ;  $I_1$  — первый инвариант тензора напряжений,  $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ , здесь  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  — главные напряжения.

Для определения указанных выше параметров свойств горных пород была выполнена их систематизация на основе классификации по контактной прочности  $P_K$ , предложенной проф. Л. И. Бароном. Результаты систематизации, полученные из различных источников, основными из которых являлись [4, 5], представлены в табл. 2;

3) принятие граничных условий, включающих время перемещения резца и величину контакта передней грани с горной породой до момента выкола крупного элемента стружки;

4) вычисление максимальных (пиковых) сил, действующих на переднюю грань в момент выкола крупного элемента стружки.

Для решения второй задачи был использован модуль ANSYS/Workbench, с помощью которого была получена картина распределения напряжений в сечении режущего клина и установлены максимальные их значения на передней грани от действующих на нее сил.

Решение третьей задачи показано на примере для режущей части, представленной армирующей вставкой из твердого сплава марки ВК8 с параметрами:  $\rho_p = 14,6 \text{ т/м}^3$ ;  $E_p = 600 \text{ ГПа}$ ;  $\nu_p = 0,2$ . Интервал варьирования угла заострения  $\delta = 50 \dots 95^\circ$  с шагом  $5^\circ$ . Постоянными при расчетах были приняты следующие параметры: задний угол  $\alpha = 25^\circ$ ; толщина стружки  $h = 2 \text{ мм}$ ; высота контакта  $h_{\text{кон}} = 1 \text{ мм}$ ; скорость резания  $v = 1 \text{ м/с}$ ; коэффициент трения твердого сплава по породе  $\mu = 0,4$ ; время выполнения расчета, учитывающее необхо-

Таблица 2

Значения физико-механических параметров горных пород в соответствии с их классификацией по контактной прочности (по проф. Л. И. Барону)

Характеристика	Ниже средней крепости			Средней крепости		Крепкие	
	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Классы пород по контактной прочности (по проф. Л. И. Барону)	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Характерные горные породы	Аргиллиты, алевролиты	Сланец песчаный, алевролиты	Песчаники полимиктовые, известняки, сланцы	Песчаники крупнозернистые, известняки, сланцы	Алевролиты известковистые, дунит, мрамор	Песчаники кварцевые, роговик, порфирит	Сидарит, скарн гранатомagneтитовый
$P_K$ , МПа	300...400	400...500	500...650	650...900	900...1250	1250...1750	1750...2450
$G$ , ГПа	8,1...10,2	10,2...11,2	11,2...13,6	13,6...17,2	17,2...25,3	25,3...32,5	32,5...35,8
$\nu$	0,31...0,27	0,27...0,28	0,28...0,26	0,26...0,29	0,29...0,25	0,25...0,22	0,22...0,20
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup> · 10 <sup>3</sup>	1,8...2,2	2,2...2,5	2,5...2,8	2,8...3,2	3,2...3,5	3,5...3,8	3,8...4,0
$C$ , МПа	7,5...10,0	10,0...12,5	12,5...16,2	16,2...22,5	22,5...31,2	31,2...43,7	43,7...61,2
$\varphi$ , °	30...31	31...32	32...33	33...35	35...36	36...38	38...40

Результаты расчетов сил резания  $F_x, F_y, H$ 

$P_K$ , МПа	350		450		600		800		1100		1500		2000	
	$F_x$	$F_y$	$F_x$	$F_y$	$F_x$	$F_y$	$F_x$	$F_y$	$F_x$	$F_y$	$F_x$	$F_y$	$F_x$	$F_y$
50	105	-17	130	-21	175	-29	245	-40	320	-52	450	-74	650	-107
55	118	-9	145	-11	195	-15	275	-21	360	-27	505	-38	730	-55
60	125	2	155	2	210	3	290	4	380	5	535	7	775	10
65	130	13	160	16	215	22	305	31	395	40	557	56	805	81
70	135	25	165	31	225	42	315	59	410	77	580	109	835	159
75	148	41	185	52	245	68	345	96	450	125	635	176	916	255
80	165	61	205	76	275	102	385	143	505	188	705	262	1020	378
85	180	85	220	104	300	141	420	198	550	259	770	362	1115	524
90	215	124	265	152	340	196	500	289	655	378	920	530	1330	767
95	250	174	310	215	415	287	585	405	760	526	1070	740	1550	1073

димую длину пути резания до выкола крупного элемента стружки,  $t_p = 1$  мс. Для достижения требуемой точности расчетов, в соответствии с рекомендациями [2], размер конечных элементов должен быть меньше, чем  $h_{кон}/5$ . Поэтому для режущей части он был принят 0,2 мм, а для горной породы — 0,1 мм. Граничные условия: левое, правое и нижнее ребра сечения породы закреплены.

Для расчета сил резания, соответствующих моменту скола крупного элемента породы, был применен критерий предельной сдвиговой деформации. Согласно этому критерию разрушение материала при сложном напряженном состоянии произойдет в том случае, когда сдвиговая деформация  $\epsilon$  в точке превысит допустимое значение  $\epsilon_{max}$ . Моделированием нами подобрано численное значение этого критерия. Для горной породы при значениях  $\epsilon_{max} = 0,3$  могут имитироваться сколы крупных элементов, что характерно для разрушения хрупких материалов. В этом случае конечные элементы считаются разрушенными и автоматически удаляются из расчетов. Момент скола крупного элемента стружки на твердотельной модели представлен на рис. 4.

Результаты расчетов значений сил, действующих на режущий клин резца в соответствии со схемой, показанной на рис. 2, приведены в табл. 3. Используя эти значения, был выполнен расчет напряжений, возникающих в материале режущей части. При этом максимальные нормальные напряжения развиваются на передней грани (рис. 5, см. 4-ю стр. обложки). Установлено, что максимальные нормальные напряжения  $\sigma_{max}$  возникают в точках, превышающих высоту контакта  $h_{кон}$ , причем с увеличением угла заострения  $\delta$  это расстояние уменьшается.

Результаты расчетов  $\sigma_{max}$  в зависимости от средних значений  $P_K$  по классам и варьировании  $\delta$  приведены в табл. 4.

Прочность режущей части, армированной пластинами твердого сплава ВК8, будет обеспечена в том случае, когда напряжения  $\sigma_{max}$  не будут превышать допускаемых напряжений  $[\sigma]$ , т. е.  $\sigma_{max} \leq [\sigma]$ .

В соответствии с рекомендациями [6] допускаемые напряжения можно найти, используя коэффициент запаса прочности  $n_3 = 2,5$ . Тогда

$$[\sigma] = \sigma_p / n_3 = 1600 / 2,5 = 640 \text{ МПа.}$$

Таблица 4

Результаты расчета максимальных нормальных напряжений  $\sigma_{max}$ , МПа, возникающих на передней грани режущего клина

$\delta, ^\circ$	Средние значения $P_K$ , МПа						
	350	450	600	800	1100	1500	2000
50	285	352	478	666	869	1226	1771
55	250	310	414	583	762	1034	1458
60	221	268	362	500	657	925	1340
65	178	219	295	418	540	762	1102
70	157	192	261	366	476	673	964
75	138	172	229	322	421	595	855
80	124	154	206	288	377	527	764
85	118	145	198	277	363	509	738
90	110	139	187	259	340	480	692
95	105	130	175	250	330	460	650

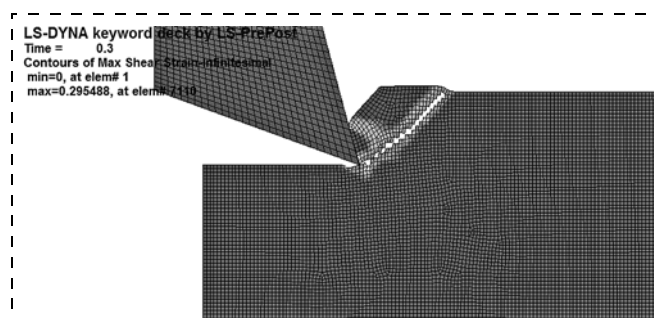


Рис. 4. Модель имитации скола крупного элемента стружки

Зависимость  $P_{к\text{пред}}$  от  $\delta, ^\circ$ 

$\delta, ^\circ$ $P_{к\text{пред}}, \text{МПа}$	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
	772,3	895,5	1067,5	1280,2	1433,0	1586,5	1738,4	1786,0	1877,4	1973,7

Используя данные табл. 4 и метод линейной интерполяции, найдем предельные значения контактной прочности  $P_{к\text{пред}}$ , при которых обеспечивается прочность режущей части с углом заострения  $\delta$  по условию  $\sigma_{\text{max}} = [\sigma] = 640 \text{ МПа}$  (табл. 5).

По результатам расчета была построена зависимость минимально допускаемого угла заострения режущей части  $\delta_{\text{доп}}$  от контактной прочности горных пород (рис. 6) и получено уравнение регрессии:

$$\delta_{\text{доп}} \geq 1,4 \cdot 10^{-5} P_{к}^2 + 0,0033 P_{к} + 45,8, ^\circ.$$

Используя полученную зависимость, можно подобрать минимально допустимый угол заострения режущей части бурового резца для заданных условий применения, характеризующихся контактной прочностью горных пород месторождения, при которых будут обеспечены ее прочность и высокая скорость бурения. Также можно решить и обратную задачу — определить предельную прочность породы, которую можно бурить резцом с конкретным углом заострения. Сравнение полученных расчетом данных с данными табл. 1 свидетельствует о том, что установленные практикой значения углов заострения  $\delta$  находятся в зоне допускаемых величин, тем самым подтверждается возможность применения метода конечных элементов для решения задач контактного взаимодействия резца с породой при резании.

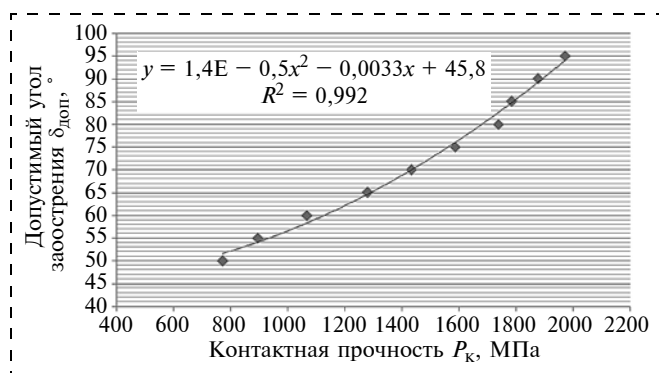


Рис. 6. Зависимость допускаемого угла заострения режущей части бурового резца от контактной прочности горной породы

## Выводы

1. Разработан метод расчета основного конструктивного параметра режущей части буровых резцов (угла заострения), сущность которого состоит в установлении зависимости напряжений в режущей части в момент скола крупного элемента породы при различных значениях углов резания и контактной прочности в определенных пределах. Рациональным считается угол заострения, при котором обеспечиваются прочность режущей части резца и максимальная скорость бурения.

2. На основании классификации горных пород по контактной прочности выполнена систематизация их физико-механических параметров, позволяющая осуществлять прямой доступ к их определению для математического моделирования процесса разрушения методом конечных элементов.

3. Установлена зависимость углов заострения режущей части буровых резцов от контактной прочности горных пород, необходимая для выбора их рациональных значений. Полученные моделированием с помощью МКЭ результаты хорошо согласуются с полученными ранее экспериментальными данными.

4. Математическое моделирование с применением метода конечных элементов позволяет достаточно точно решать задачи горной геомеханики и прочности сложных изделий, каковыми являются буровые резцы, и может быть применено при создании САПР буровых резцов.

## Список литературы

1. Крапивин М. Г., Раков И. Я., Сысоев Н. И. Горные инструменты. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1990. 256 с.
2. LSTC, LS-DYNA Keyword User's Manual, Version 971, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, Calif, USA, 2007.
3. Фадеев А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М.: Недра, 1987. 221 с.
4. Алексеев С. Ф., Мележик В. П. Физика горных пород. Горное давление: Сб. задач и упражнений. Киев: Выща шк. Головное изд-во, 1988. 248 с.
5. Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики горных пород. 2-е изд., перераб. М.: Недра, 1973. 286 с.
6. Сысоев Н. И. Методы повышения прочности и долговечности режущих инструментов очистных и проходческих машин: дис. ... д-ра техн. наук. Новочеркасск: НПИ, 1992. 464 с.

**N. I. Sysoev**, Professor, e-mail: SysoevNI@npi-tu.ru,

**N. N. Burenkov**, Associate Professor, **Chu Kim Hung**,

Postgraduate Student, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia

## Choice of the Rational Parameters of Cutting Part Drilling Tools with Using the Finite Element Method

*The paper presents the calculation method of rational design parameters cutting part of the drill cutters providing high efficiency blast hole drilling and its required strength. At the same time, finite element method, implemented software package ANSYS are used. Due to the rocks classification on the contact strength, proposed by prof. L. I. Baron, the systematization of their physical and mechanical parameters were performed. The minimal taper angle dependence on the contact strength of rocks have been established.*

**Keywords:** blast hole drilling, drilling cutter, physical and mechanical parameters of rocks, classification of rocks on the contact strength, calculation method, finite-element method

### References

1. **Krapivin M. G., Rakov I. Ya., Sysoev N. I.** *Gornye instrumenty*. 3-e izd., pererab. i dop., Moscow, Nedra, 1990, 256 p. (in Russian).

2. **LSTC**, LS-DYNA Keyword User's Manual, Version 971, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, Calif, USA, 2007.

3. **Fadeev A. B.** *Metod konechnykh ehlementov v geometrii*, Moscow, Nedra, 1987, 221 p. (in Russian).

4. **Alekseenko S. F., Melezhik V. P.** *Fizika gornyh porod. Gornoe davlenie: Sb. zadach i uprazhnenij*, Ukraine, Kiev, Vyscha shk. Golovnoe izd-vo, 1988, 248 p. (in Russian).

5. **Rzhevskij V. V., Novik G. Ya.** *Osnovy fiziki gornyh porod*. 2-e Izd., pererab., Moscow, Nedra, 1973, 286 p. (in Russian).

6. **Sysoev N. I.** *Metody povysheniya prochnosti i dolgovechnosti rezhushchih instrumentov ochistnyh i prohodcheskih mashin: dis. ... d-ra tekhn. nauk*. Novocherkassk, NPI, 1992, 464 p. (in Russian).

УДК 621.879.328

**С. А. Шемякин**, д-р техн. наук, проф., ТОГУ,

**А. Ю. Чебан**, канд. техн. наук, науч. сотр., ИГД ДВО РАН, г. Хабаровск

E-mail: chebanay@mail.ru

## Определение сопротивления резанию мерзлых пород глубокоблокированным (щелевым) способом

*На основании анализа схемы действия сил и напряжений на отделяющийся элемент стружки в предельном состоянии при глубокоблокированном способе дана аналитическая зависимость (математическая модель) для расчета усилия резания мерзлой породы.*

**Ключевые слова:** мерзлая порода, выемочные машины, глубокоблокированное резание, аналитическая зависимость, сопротивление резанию

Под глубокоблокированным (щелевым) способом резания понимают процесс, при котором режущий инструмент входит в прорезь, сделанную предыдущим проходом, срезает стружку определенной толщины и поднимает ее из прорези на поверхность земли. Глубокоблокированный

способ резания мерзлых пород имеет место в нижней части забоя при черпании, например, ковшом роторного траншейного экскаватора. Это связано с тем, что в нижней части траншеи развал породы в прорезях, оставляемых зубьями, практически отсутствует из-за незначительной крепости по-

роды и малой толщины срезаемых стружек (рис. 1). Глубокоблокированное резание может быть и в верхней части траншеи, если шаг между линиями резания зубьев выбран большим, а подачи экскаватора на один оборот ротора малы.

Нарезание тонкими стружками узких, но достаточно глубоких щелей для прокладки комму-

никаций или дренажа на открытых горных работах и в строительстве зубьями рыхлителей или баровых и фрезерных установок на базе тракторов также происходит рассматриваемым способом.

Глубокоблокированный способ резания исследовался только экспериментально [1] и в малом диапазоне изменений толщин стружек. В связи с

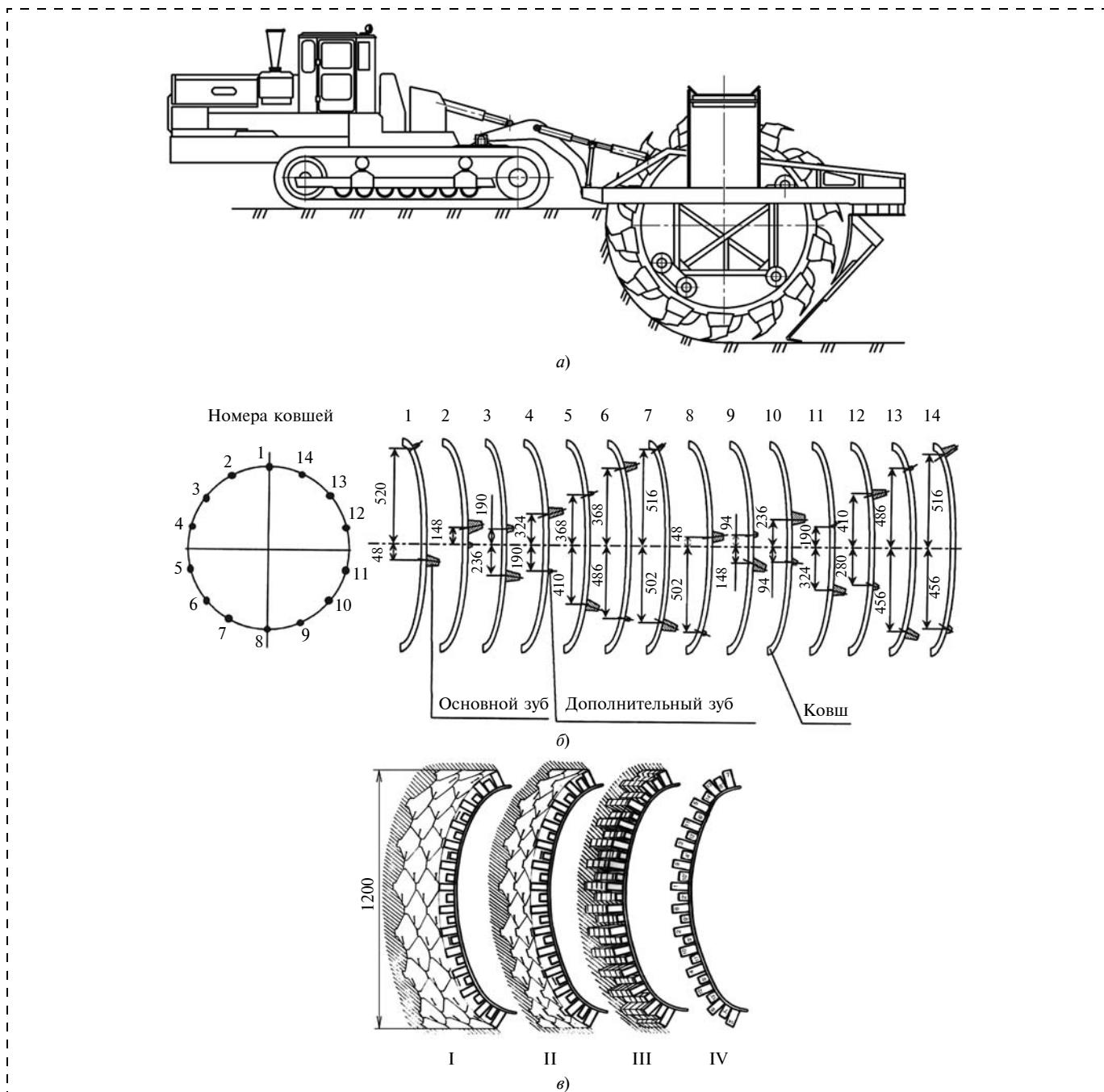


Рис. 1. Разрушение мерзлой мелкозернистой породы роторным траншейным экскаватором:

*a* — экскаватор ЭТР-204А при копании; *б* — схема расстановки зубьев на ковшах ротора ЭТР-204А для разработки мерзлых пород; *в* — сетки разрушения породы на различных уровнях в забое (I — на глубине  $H = 0,2$  м от поверхности; II — на глубине  $H = 1,45$  м; III — на глубине  $H = 1,91$  м, глубокоблокированное резание; IV — зубья ротора, условно перенесенные на один ковш)



этим теоретическое определение сопротивлений резанию мерзлых пород глубокоблокированным способом представляет значительный интерес.

Составляющую сопротивления глубокоблокированному резанию, а именно касательную к направлению движения рабочего органа можно представить в виде:

$$P_{01} = P_{x1} + P_{x2}, \quad (1)$$

где  $P_{x1}$  — касательная составляющая сопротивления резанию в зоне 1 (рис. 2);  $P_{x2}$  — касательная составляющая сопротивления резанию в зоне 2.

Нормальная составляющая сопротивления глубокоблокированному резанию соответственно равна

$$P_{02} = P_{y1} + P_{y2}. \quad (2)$$

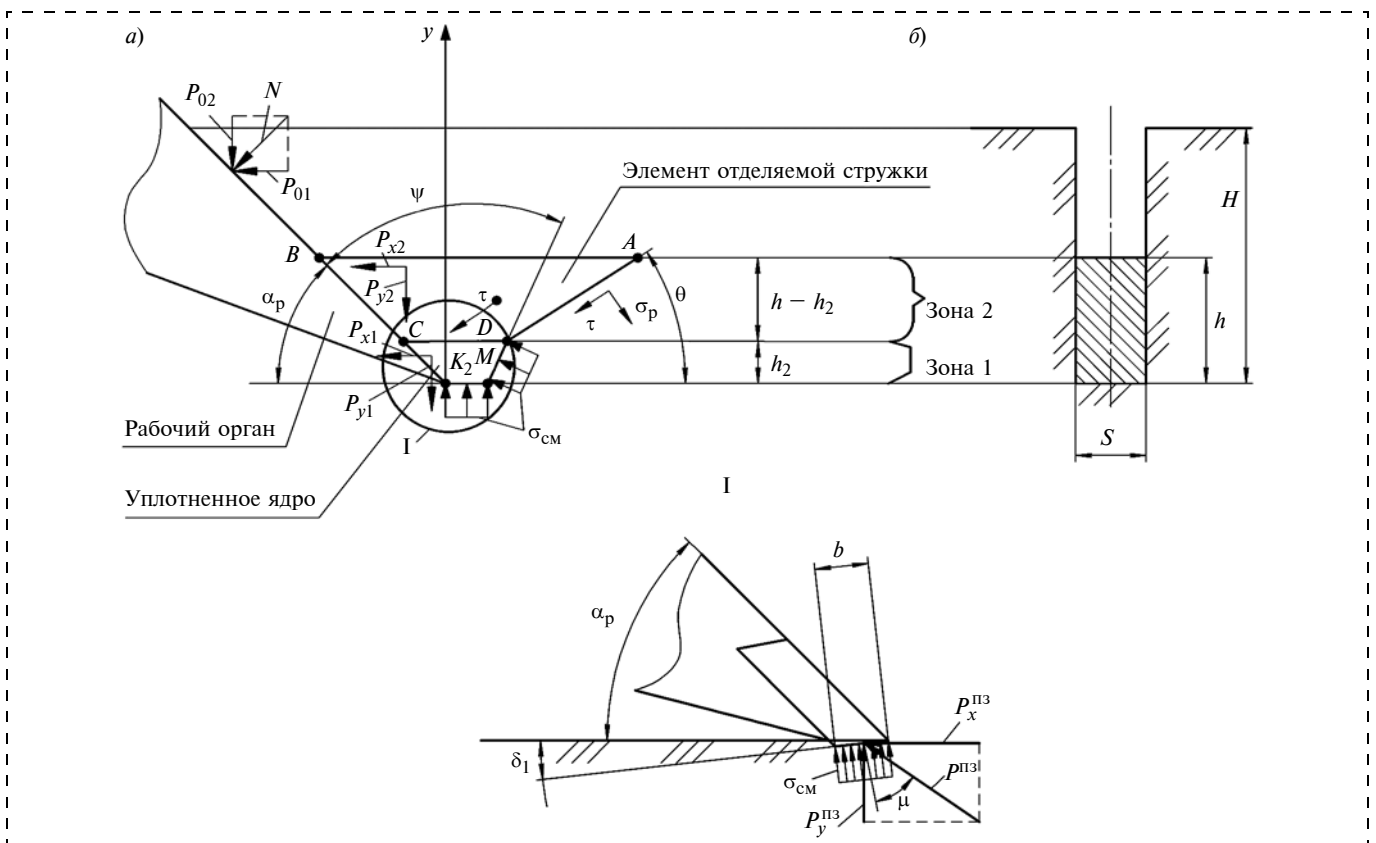
Составляющую  $P_{x1}$ , действующую в области уплотненного ядра породы, можно определить так же, как для заблокированного [2] или сотового

(крупного скола) [3] способов резания (рис. 3) по зависимости:

$$P_{x1} = \sigma_{см} \left[ Sh_2 + \frac{\xi_1 h_2^2 \operatorname{tg} \varphi_2 \sin(2\alpha_p + \psi)}{\sin(\alpha_p + \psi)} + \frac{\xi_1 \pi S^2 \operatorname{tg} \varphi_2}{8} + \frac{\pi Sh_2 \operatorname{tg} \varphi_2 \operatorname{ctg}(\alpha_p + \psi)}{2} \right], \quad (3)$$

где  $\sigma_{см}$  — напряжение смятия, действующее на уплотненное ядро;  $S$  — ширина режущей кромки рабочего органа;  $h_2$  — высота уплотненного ядра;  $\varphi_2$  — угол внутреннего трения;  $\alpha_p$  — угол резания;  $\psi$  — угол наклона образующей лобовой цилиндрической поверхности уплотненного ядра;  $\xi_1$  — коэффициент бокового распора породы (по данным В. А. Захарова [4],  $\xi_1 = 0,2 \dots 0,66$ ).

В формуле (3) первое слагаемое представляет касательную составляющую сопротивления реза-



**Рис. 2.** Схема действия сил и напряжений на отделяющийся элемент стружки в предельном состоянии при глубокоблокированном резании: *a* — вид сбоку на зуб и отделяемую стружку; *б* — поперечное сечение прорези и стружки; *I* — окончание зуба с площадкой затупления;  $\alpha_p$  — угол резания;  $\theta$  — угол сдвига элемента стружки;  $\psi$  — угол между лобовой поверхностью зуба и лобовой поверхностью уплотненного ядра;  $\tau$  и  $\sigma_p$  — соответственно касательные и нормальные напряжения по поверхности отделяемого элемента стружки;  $h$  — глубина резания (толщина стружки);  $h_2$  — толщина стружки в области уплотненного ядра;  $\sigma_{см}$  — напряжения смятия породы по лобовой, боковой и нижней граням уплотненного ядра, а также на площадке затупления зуба;  $P_{x1}$ ,  $P_{y1}$ ,  $P_{x2}$ ,  $P_{y2}$  — соответственно нормальные и касательные составляющие сопротивлений  $P_{01}$  и  $P_{02}$ ;  $S$  — ширина прорези (зуба);  $b$  — длина площадки затупления;  $P^{пз}$ ,  $P_x^{пз}$ ,  $P_y^{пз}$  — соответственно полное и составляющие сопротивления по площадке затупления;  $\mu$  — угол между  $P^{пз}$  и нормалью к площадке затупления;  $\delta_1$  — угол между плоскостью площадки затупления и осью  $x$ ;  $ABCD$  — точки, ограничивающие зону 2 (элемента отделяемой стружки);  $CDMK_2$  — точки, ограничивающие зону 1 (область уплотненного ядра)

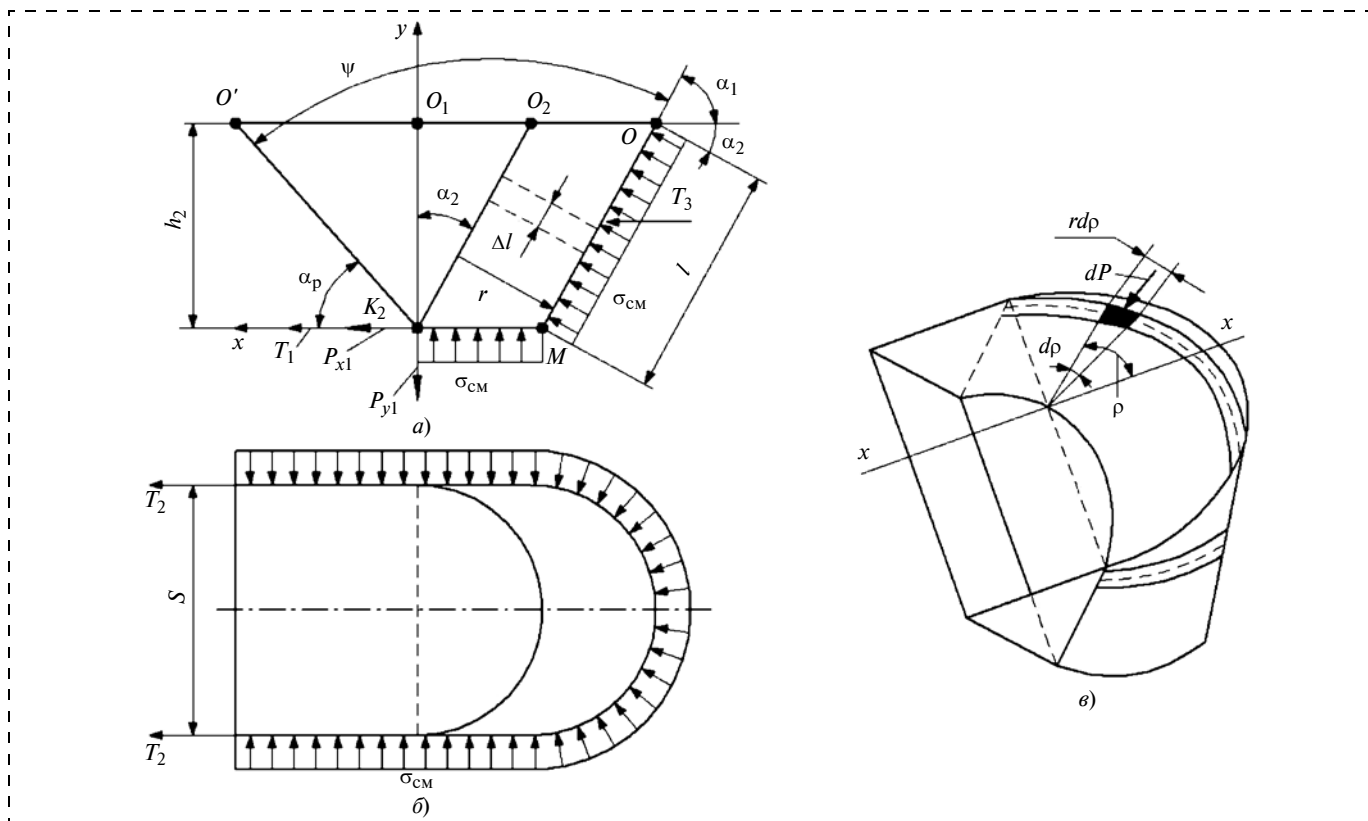


Рис. 3. Расчетная схема для определения сопротивления резанию в зоне 1:

*a* — вид сбоку на уплотненное ядро (зона 1); *б* — вид сверху на уплотненное ядро; *в* — уплотненное ядро в аксонометрии;  $h_2$  — высота зоны 1;  $l$  — длина образующей округлой поверхности уплотненного ядра;  $\alpha_2$  — угол наклона лобовой поверхности ядра;  $r$  — радиус кривизны лобовой поверхности ядра;  $\Delta l$  — толщина элементарной полосы по округлой поверхности ядра;  $rd\rho$  — длина элементарной площадки по лобовой поверхности ядра;  $\rho$  — угол поворота элементарной площадки относительно оси  $x-x$ ;  $d\rho$  — радиальный угол, определяющий положение элементарной площадки;  $T_1$  — сопротивление трению по нижней грани  $K_2M$  уплотненного ядра;  $T_2$  — сопротивление трению по двум боковым поверхностям  $K_2O'O_2$ ;  $T_3$  — сопротивление трению о лобовую поверхность уплотненного ядра

нию, действующую на цилиндрическую часть уплотненного ядра. Эта составляющая получена в результате интегрирования напряжений смятия  $\sigma_{CM}$  по цилиндрической поверхности уплотненного ядра с образующей  $OM$  (см. рис. 3). Второе слагаемое — это сопротивление трению (силы  $T_2$  на рис. 3, б), действующее по двум боковым поверхностям ( $K_2O'O_2$ ). Третье слагаемое — сопротивление трению (сила  $T_1$ ) по нижней горизонтальной поверхности ( $K_2M$ ) уплотненного ядра. Четвертое слагаемое — сопротивление трению о лобовую поверхность уплотненного ядра  $T_3$ .

Нормальная составляющая  $P_{y1}$  соответственно будет равна

$$P_{y1} = \sigma_{CM} \left[ Sh_2 \operatorname{ctg}(\alpha_p + \psi) + \frac{\xi_1 \pi S^2}{8} - \frac{\pi Sh_2 \operatorname{tg} \varphi_2}{2} - \frac{\xi_1 h_2^2 \operatorname{tg} \varphi_2 \sin 2\alpha_p + \psi}{\operatorname{tg} \alpha_p \sin(\alpha_p + \psi)} \right]. \quad (4)$$

Составляющая  $P_{x2}$  (см. рис. 2) во второй зоне равна

$$P_{x2} = P_6 + P_{AD} + P_{\Pi}, \quad (5)$$

где  $P_6$  — касательная составляющая сопротивления сдвигу по двум боковым плоскостям  $ABCD$ ;  $P_{AD}$  — касательная составляющая сопротивления отделению элемента стружки по плоскости  $AD$ ;  $P_{\Pi}$  — касательная составляющая сопротивления продвижению срезанной стружки по лобовой поверхности рабочего органа из глубокоблокированной прорези.

Составляющая  $P_6$  равна

$$P_6 = 2\tau F_{ABCD} \cos \theta, \quad (6)$$

где  $\tau$  — предельное сопротивление сдвигу породы;  $F_{ABCD}$  — площадь боковой поверхности сдвига, ограниченная точками  $ABCD$ ;  $\theta$  — угол наклона передней поверхности отделяющегося элемента стружки к оси  $x$ .

Из геометрии боковой поверхности сдвига следует

$$F_{ABCD} = \left\{ \frac{(h-h_2)^2}{2\operatorname{tg}\alpha_p} + \frac{h_2^2}{\operatorname{tg}\alpha_p} + h_2^2 \operatorname{tg}[\psi - (90 - \alpha_p)] + \frac{h_2 S}{2} + \frac{(h-h_2)^2}{2\operatorname{tg}\theta} \right\}. \quad (7)$$

Тогда

$$P_6 = 2\tau \cos\theta \left\{ \frac{(h-h_2)^2}{2\operatorname{tg}\alpha_p} + \frac{h_2^2}{\operatorname{tg}\alpha_p} + h_2^2 \operatorname{tg}[\psi - (90 - \alpha_p)] + \frac{h_2 S}{2} + \frac{(h-h_2)^2}{2\operatorname{tg}\theta} \right\}. \quad (8)$$

Составляющая  $P_{AD}$  равна

$$P_{AD} = S\tau(h-h_2)\cos\theta - \sigma_p S(h-h_2)\sin\theta = S(h-h_2)(\tau\cos\theta - \sigma_p\sin\theta). \quad (9)$$

Составляющая  $P_{\Pi}$  возникает от силы тяжести и силы трения продвигающейся стружки по лобовой поверхности рабочего органа на высоту  $(H-h)$ .

В этом случае:

$$P_{\Pi} = h(H-h)S\gamma_T \cos\alpha_p (\mu_1 \cos\alpha_p + \sin\alpha_p), \quad (10)$$

где  $\gamma_T$  — объемная сила тяжести срезанной породы;  $\mu_1$  — коэффициент трения породы о сталь.

Нормальная составляющая сопротивления глубокоблокированному резанию  $P_{y2}$  определяется аналогично  $P_{x2}$ , но с учетом проектирования сил на ось  $y$ :

$$P_{y2} = P_6^y + P_{AD}^y + P_{\Pi}^y, \quad (11)$$

где  $P_6^y$  — нормальная составляющая сопротивления сдвигу по двум боковым плоскостям  $ABCD$ ;  $P_{AD}^y$  — нормальная составляющая сопротивления резанию по плоскости  $AD$ ;  $P_{\Pi}^y$  — нормальная составляющая сопротивления продвижению срезанной стружки по лобовой поверхности рабочего органа из глубокоблокированной прорези.

Составляющая  $P_6^y$  равна

$$P_6^y = 2\tau F_{ABCD} \sin\theta \quad (12)$$

или

$$P_6^y = 2\tau \sin\theta \left\{ \frac{(h-h_2)^2}{2\operatorname{tg}\alpha_p} + \frac{h_2^2}{\operatorname{tg}\alpha_p} + h_2^2 \operatorname{tg}[\psi - (90 - \alpha_p)] + \frac{h_2 S}{2} + \frac{(h-h_2)^2}{2\operatorname{tg}\theta} \right\}. \quad (13)$$

Составляющая  $P_{AD}^y$  равна

$$P_{AD}^y = S\tau(h-h_2)\sin\theta - \sigma_p S(h-h_2)\cos\theta. \quad (14)$$

Составляющая  $P_{\Pi}^y$  равна

$$P_{\Pi}^y = h(H-h)S\gamma_T \sin\alpha_p (\mu_1 \cos\alpha_p + \sin\alpha_p). \quad (15)$$

Путем сложения составляющих сопротивлений в зонах 1 и 2 и в случае учета сопротивлений, связанных с затуплением рабочего органа, находятся окончательные зависимости для определения сопротивлений резанию глубокоблокированным способом  $P_{01}$  и  $P_{02}$ :

$$P_{01} = P_{x1} + P_{x2} + P_x^{\text{пз}}; P_{02} = P_{y1} + P_{y2} + P_y^{\text{пз}}. \quad (16)$$

Дополнительные сопротивления резанию на площадке износа  $P_x^{\text{пз}}$  и  $P_y^{\text{пз}}$  можно определить по методике Ю. А. Ветрова [5], полагая, что удельное давление на площадку износа достигает напряжения  $\sigma_{\text{см}}$ .

В этом случае:

$$P_x^{\text{пз}} = \frac{\sigma_{\text{см}} b S \sin(\delta_1 + \mu)}{\cos\mu}; \quad (17)$$

$$P_y^{\text{пз}} = \frac{\sigma_{\text{см}} b S \cos(\delta_1 + \mu)}{\cos\mu}, \quad (18)$$

где  $b$  — ширина площадки износа;  $\delta_1$  — угол наклона между плоскостью площадки износа и касательной к траектории движения рабочего органа;  $\mu$  — угол трения породы по рабочему органу.

Выведенные зависимости для определения сопротивлений резанию глубокоблокированным способом дают возможность более обоснованно подходить к расчету выемочных машин, предназначенных для работы в мерзлых породах.

#### Список литературы

1. Доценко А. И., Карасев Г. Н., Кустарев Г. В., Шестопалов К. К. Машины для земляных работ: учеб. для студентов вузов. М.: БАСТЕТ, 2012. 688 с.

2. **Шемякин С. А., Клигунов Е. С.** Сопротивление резанию однородных и неоднородных мерзлых пород // Строительные и дорожные машины. 2004. № 2. С. 37—42.

3. **Шемякин С. А., Иванченко С. Н., Чебан А. Ю.** Математическая модель для расчета усилия рыхления выемочными машинами мерзлой породы крупным сколом //

Горное оборудование и электромеханика. 2014. № 4. С. 44—48.

4. **Захаров В. А.** Об определении сопротивления движению инструмента при разрушении мерзлых грунтов // Строительные и дорожные машины. 1971. № 11. С. 24—28.

5. **Ветров Ю. А.** Резание грунтов землеройными машинами. М.: Машиностроение, 1971. 360 с.

**S. A. Shemyakin**, Professor, e-mail: lesch@sdm.khstu.ru, Pacific State University,

**A. Yu. Cheban**, Research Associate, e-mail: chebanay@mail.ru,

Mining Institute of the far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

## Determination of Resistance to Cutting of Frozen Rocks Deeply Blocked (Slot)

*The analytical dependence (mathematical model) to calculate the cutting forces permafrost rocks on the basis of the analysis scheme of the forces and stresses on the element chip to the limit state when deeply blocked the way are proposed.*

**Keywords:** frozen rock, excavation machines, deeply blocked cutting, analytical dependence, cutting resistance

### References

1. **Docenko A. I., Karasev G. N., Kustarev G. V., Shestopalov K. K.** *Mashiny dlja zemljanyh rabot: uchebnik dlja studentov vuzov*, Moscow, BASTET, 2012, 688 p. (in Russian).

2. **Shemjakin S. A., Kligunov E. S.** Soprotivlenie rezaniju odnorodnyh i neodnorodnyh merzlyh porod. *Stroitel'nye i Dorozhnye Mashiny*, 2004, no. 2, pp. 37—42 (in Russian).

3. **Shemjakin S. A., Ivanchenko S. N., Cheban A. Ju.** Matematicheskaja model' dlja rascheta usilija ryhlenija

vyemochnymi mashinami merzloj porody krupnym skolom. *Gornoe Oborudovanie i Jelektromehanika*, 2014, no. 4, pp. 44—48 (in Russian).

4. **Zaharov V. A.** Ob opredelenii soprotivlenija dvizheniju instrumenta pri razrushenii merzlyh gruntov. *Stroitel'nye i Dorozhnye Mashiny*, 1971, no. 11, pp. 24—28 (in Russian).

5. **Vetrov Ju. A.** *Rezanie gruntov zemlerojnymi mashinami*. Moscow, Mashinostroenie, 1971. 360 p. (in Russian).

УДК 672.72.01

**М. Н. Хальфин**, д-р техн. наук, проф., **А. Х. Аль-Джумаили**, магистрант, ЮРГПУ (НПИ) им. М. И. Платова, г. Новочеркасск

E-mail: xalfinmn@mail.ru

## Влияние температурных напряжений на величину допустимого радиуса волнистости шахтного подъемного каната

*Существующие методы расчета допустимого радиуса волнистости каната двойной свивки с металлическим сердечником не учитывают температурных напряжений, возникающих вследствие различия температур винтовых элементов, расположенных в разных слоях канатов. Вследствие резкого попадания каната под воздействие высокой температуры происходит неравномерный нагрев слоев его винтовых элементов, приводящий к изменению напряженно-деформированного состояния и, соответственно, к потере несущей способности каната.*

*Рассмотрен нагрев единичного участка каната, состоящего из трех слоев винтовых элементов, имеющих соответствующую площадь поперечного сечения и температуру.*

*Получены выражения температурных удлинений каната в целом и его винтовых элементов при неравномерном нагреве. Выведены условия прочности наиболее нагруженной проволоки каната, имеющие волнистость с учетом снижения предела прочности материала проволоки. Показано, что при высокотемпературном воздействии, температуре выше 400 °С, стальные канаты нельзя эксплуатировать даже при отсутствии в них дефекта волнистости.*

**Ключевые слова:** шахтный подъемный канат, температурные, напряжение, радиус волнистости, усилия в канате, металлический, сердечник

В работах [1, 2] описан метод расчета допустимого радиуса волнистости с учетом предела прочности материала канатной проволоки, коэффициента запаса прочности, конструктивных параметров каната и других факторов. Однако данный метод не учитывает температурных напряжений, возникающих в стальном канате вследствие различия температур винтовых элементов, расположенных в разных слоях каната.

Очевидно, что при эксплуатации стального каната вследствие резкого попадания каната под воздействие высокой температуры происходит неравномерный нагрев слоев винтовых элементов, приводящий к изменению напряженно-деформированного состояния и, соответственно, к потере его несущей способности.

Рассмотрим нагрев единичного участка каната, состоящего, например, из трех слоев винтовых элементов, имеющих соответствующую площадь поперечного сечения  $F$  и температуру  $t_i$  (рис. 1).

Вследствие различия температуры элементы стального каната удлиняются неодинаково. При независимой работе относительное удлинение каждого элемента составит  $kt_i$ , где  $i$  — номер элемента;  $k$  — температурный коэффициент линейного расширения.

При совместной работе элементов каната их взаимное продольное перемещение отсутствует, поперечное сечение каната А—А при нагревании остается плоским и занимает положение Б—Б. При этом в каждом элементе возникают дополнительные температурные растягивающие (или сжи-

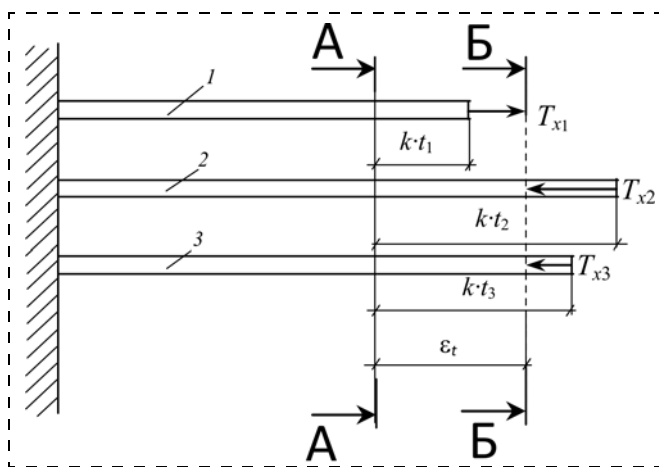


Рис. 1. Расчетная схема неравномерности нагрева элементов стального каната:  
1 — центральная прядь; 2 — наружные пряди; 3 — пряди сердечника

мающие) усилия  $T_{xi}$ . Эти усилия определяются выражениями

$$\begin{aligned} T_{x1} &= (\varepsilon_t \cos^2 \beta_1 - kt_1) E F_1 \cos \beta_1; \\ T_{x2} &= (\varepsilon_t \cos^2 \beta_2 - kt_2) E F_2 \cos \beta_2; \\ T_{x3} &= (\varepsilon_t \cos^2 \beta_3 - kt_3) E F_3 \cos \beta_3, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $E$  — модуль упругости первого рода;  $\varepsilon_t$  — относительное температурное удлинение каната.

При отсутствии внешнего растягивающего усилия:

$$T_{x1} + T_{x2} + T_{x3} = 0 \text{ или } \sum_i T_{xi} = 0. \quad (2)$$

Подставляя формулу (1) в формулу (2), имеем

$$\sum_i (\varepsilon_t \cos^2 \beta_i - kt_i) E F_i \cos \beta_i = 0. \quad (3)$$

После преобразования (3) получаем выражение для определения температурного удлинения каната в целом при неравномерном нагреве его винтовых элементов:

$$\varepsilon_t = \frac{\sum_i kt_i F_i \cos \beta_i}{\sum_i F_i \cos^3 \beta_i}. \quad (4)$$

Подставив выражение (4) в (1), получим значения дополнительных усилий в элементах каната  $T_{x1}$ ,  $T_{x2}$ ,  $T_{x3}$  и напряжений в соответствующих элементах при их нагреве:

$$\sigma_i = \frac{T_{xi}}{F_i \cos \beta_i} \text{ или } \sigma_i = (\sigma_p + \sigma_t) = E(\varepsilon_t \cos^2 \beta_i - kt_i). \quad (5)$$

Согласно [1] допустимое значение радиуса волнистости  $R_B$  определяется исходя из условия прочности наиболее нагруженной проволоки каната:

$$\sigma_p + \Delta \sigma_p \leq \frac{\sigma_{вп}}{z}, \quad (6)$$

где  $\sigma_p$  — напряжение растяжения в проволоке от действия растягивающей силы, определяемое по формулам проф. М. Ф. Глушко [3, стр. 55];  $\Delta \sigma_p$  — дополнительное напряжение растяжения в проволоке, возникающее вследствие волнистости каната, определяемое по формуле, предложенной автором настоящей статьи [1, стр. 8];  $\sigma_{вп}$  — предел прочности материала канатной проволоки;  $z$  — коэффициент запаса прочности наиболее нагруженной проволоки.

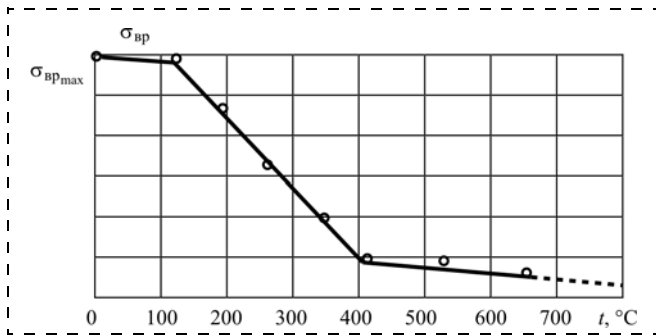


Рис. 2. Влияние температуры нагрева на разрывное усилие канатной проволоки

Проволока шахтных канатов может подвергаться, помимо растяжения, кручения, изгиба, также воздействию высоких температур.

Как следует из рис. 2, при температурах нагрева каната до 120 °C предел прочности канатной проволоки не меняется, оставаясь максимальным [4, 5]. При температурах от 120 до 410 °C предел прочности снижается по линейному закону от своего максимального значения  $\sigma_{вр\max}$  до  $0,15\sigma_{вр\max}$ .

При температурах свыше 410 °C предел прочности снижается по линейному закону, достигая нуля при температуре 1050 °C [4, 5].

Изменение предела прочности материала канатной проволоки в зависимости от температуры можно выразить следующим аналитическим выражением:

$$\sigma_{тр} = \begin{cases} \sigma_{вр\max}, & \text{если } t \leq 120 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \frac{392 - 0,85t}{290} \sigma_{вр\max}, & \text{если } 120 \text{ } ^\circ\text{C} < t \leq 410 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \frac{157,7 - 0,15t}{640} \sigma_{вр\max}, & \text{если } t > 410 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (7)$$

Тогда коэффициент запаса прочности  $z_p$  примет вид  $z_p = kz_{\max}$ , где  $k$  — коэффициент снижения прочности при высокотемпературном воздействии:

$$\begin{cases} t \leq 120 \text{ } ^\circ\text{C} & k = 1; \\ 120 \text{ } ^\circ\text{C} < t \leq 410 \text{ } ^\circ\text{C} & k = (1 \dots 0,15); \\ t > 410 \text{ } ^\circ\text{C} & k < 0,15. \end{cases} \quad (8)$$

С учетом температурных напряжений  $\sigma_t$  и снижения предела прочности материала канатной проволоки выражение (6) примет вид

$$(\sigma_p + \sigma_t) + \Delta\sigma_p \leq \frac{\sigma_{вр}K}{z}. \quad (9)$$

После подстановки выражения (9) в формулу (27) [1, стр. 10] имеем

$$\frac{R_B}{R_k} \leq \frac{\frac{\sigma_{вр}K}{z} - (\sigma_p + \sigma_t)}{R_k T_x E \cos^2 \alpha \cos \beta \left[ \frac{\Delta_1}{\Delta} \cos^2 \beta + \frac{r}{R} \cos \alpha \sin^3 \beta \cos \beta + \frac{\Delta_2}{\Delta} R (\sin \beta \cos \beta + \frac{r}{R} \cos^4 \beta) + \frac{\Delta_3}{\Delta} R \cos^2 \beta \right]}, \quad (10)$$

где  $R_k$  — радиус каната;  $R_B$  — радиус волнистости;  $T_x$  — сила натяжения каната.

Здесь  $\alpha, \beta$  — углы свивки проволок и прядей соответственно;  $r, R$  — радиусы свивки проволок и прядей;  $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$  — определители второго порядка;  $\Delta$  — определитель третьего порядка, элементами которых являются агрегатные коэффициенты жесткости каната  $A_{11}, A_{12}, A_{22}$ , определяемые по выражениям (П.60, П.61, П.63) [4, стр. 84], и  $A_{14}, A_{24}, A_{44}$  — определяемые по методике [2, стр. 38].

Выражение (10) с учетом формулы (5) запишется в виде

$$\frac{R_B}{R_k} \leq \frac{\frac{\sigma_{вр}K}{z} - E(\varepsilon \cos^2 \beta_i + kt_i)}{R_k T_x A}. \quad (11)$$

Таким образом, получено выражение допустимого радиуса волнистости стального каната в относительной форме, позволяющее учесть уменьшение предела прочности материала канатной проволоки вследствие нагрева. Эта формула может быть использована для определения нормы браковки (по критерию волнистости) стального каната при высокотемпературном воздействии.

Анализ выражения (11) показал, что при температурах свыше 400 °C стальные канаты нельзя эксплуатировать даже при отсутствии в них дефекта волнистости.

Для браковки каната, нагретого до температуры 400 °C, нами предлагается использовать в канатах индикаторные проволоки [6], меняющие свой цвет при нагревании. Это позволит повысить безопасность эксплуатации стальных канатов за счет своевременного обнаружения факта потери его несущей способности в результате высокотемпературного нагрева.

#### Список литературы

1. Хальфин М. Н. Расчет стальных канатов с учетом различия геометрических параметров и механических

свойств проволок // Известия вузов. Сев.-Кавк. регион. техн. науки. 2005. Спец. выпуск. С. 5—13.

2. Хальфин М. Н. Теория и расчет стальных канатов с учетом различия геометрических параметров и механических свойств проволок // Горное оборудование и электромеханика. № 10. 2007. С. 37—41.

3. Глушко М. Ф. Стальные подъемные канаты. Киев: Техника. 1966. 327 с.

4. Липатов А. С. Методы повышения безопасности грузоподъемных кранов при ненормируемых условиях эксплуатации. Дисс. ... д-ра техн. наук. Новочеркасск, 2006. 259 с.

5. Козлов В. Т. Исследование механических характеристик канатной проволоки при повышенных температурах / В. И. Тумански. // Стальные канаты. Вып. 6. Киев: Техника, 1969. С. 278—280.

6. Пат. 2299939 RU C2, МПК<sup>7</sup> D07B 1/14. Стальной канат и способ его браковки / Короткий А. А., Хальфин М. Н., Липатов А. С., Котельников В. С., Короткий Д. А., Козловский А. Е., Маслов В. Б., Коваленко О. А., Кинджибалов А. В., заявл. 13.04.2005; опубл. 27.05.2007, Бюл. № 15.

M. N. Khal'fin, Professor, e-mail: xalfinmn@mail.ru, A. Kh. Al'-Jumali, Under Graduate, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherchassk, Russia

## Effect Thermal Stresses on the Value of Allowable Radius Waviness of Mine Hoisting Rope

*Existing methods of calculation of the permissible radius undulation rope double strand with a metal core does not take into account thermal stresses resulting from temperature differences screw elements arranged in different layers of the ropes. Due to sharp falling of the rope under the influence of high temperature, uneven heating of the layers of the spiral elements leading to change of stress-strain state and, accordingly, the loss of carrying capacity of the rope. Was considered the heating unit of the ridge rope consisting of three layers of screw elements having a corresponding cross-sectional area and temperature. Expressions have been obtained temperature movements of the rope as a whole and its screw elements with uneven heating. The strength of the most loaded wire rope having a waviness with regard to the reduction of the tensile strength of the wire material. It is shown that at high temperature the influence of temperature above 400 °C steel ropes must not be operated rope even in the absence of the defect waviness.*

**Keywords:** temperature, stress, radius, waviness, mine hoisting rope, force, metal core

### References

1. Hal'fin M. N. Calculation of steel ropes, taking into account differences in the geometric parameters and mechanical properties of the wires. *Math. Universities. North-Kavko. region. tech. nauki.* 2005. Spetsvypusk. P. 5—13 (in Russian).

2. Hal'fin M. N. Theory and calculation of steel ropes, taking into account differences geometric parameters and mechanical properties of the wires. *Mining Machinery and Electrical Engineering.* N. 10. 2007. P. 37—41 (in Russian).

3. Glushko M. F. Steel lifting ropes, Kiev, Engineering, 1966, 327 p. (in Russian).

4. Lipatov A. S. Methods of improving the safety of cranes at nonnormable conditions: *Diss. ... d-r tech. nayk.* Novocherchassk, 2006. 259 p. (in Russian).

5. Kozlov V.T. Investigation of mechanical properties of the cable wires at higher temperatures. *Steel ropes. V. 6,* Kiev, Engineering, 1969. P. 278—280.

6. Pat. 2299939 C2, МПК<sup>7</sup> D07B 1/14. Steel cable and a method of grading. Karotkiy A. A., Halfin M. N., Lipatov A. S., Katyolnikov B. C., Karotkiy D. A., Kozlovsky A. E., Maslov V. B., Kovalenko O. A., Kindzhibalov A. V., 13.04.2005; publ. 27-05-2007, Byul. N. 15.

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

Технический редактор Е.В. Конова. Корректор Т.В. Пчелкина.

Сдано в набор 15.06.2015. Подписано в печать 28.07.2015. Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Заказ ГО615. 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 "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: [www.aov.ru](http://www.aov.ru)

# XIV МЕЖДУНАРОДНЫЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ – 2015

МЕЖДУНАРОДНЫЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ВЫСТАВКИ И КОНФЕРЕНЦИИ



**МЕТАЛЛО-  
ОБРАБОТКА**

МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИЕ  
ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ



**УКРПЛАСТ  
ТЕХ**

ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ  
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА  
И ПЕРЕРАБОТКИ ПЛАСТМАСС



**ГИДРАВЛИКА  
ПНЕВМАТИКА**

ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ  
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА  
И ПЕРЕРАБОТКИ ПЛАСТМАСС



**УКРПРОМ  
АВТОМАТИЗАЦИЯ**

ПРОМЫШЛЕННАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ



**ОБРАЗЦЫ, СТАНДАРТЫ,  
ЭТАЛОНЫ, ПРИБОРЫ**

КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ,  
ЛАБОРАТОРНОЕ И ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ  
ОБОРУДОВАНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ



**БЕЗОПАСНОСТЬ  
ПРОИЗВОДСТВА**

СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ, БЕЗОПАСНОСТЬ  
РАБОЧЕЙ ЗОНЫ



**УКРМАШ  
ТЕХ**

ПРОМЫШЛЕННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ



**УКРВТОР  
ТЕХ**

КОМИССИОННАЯ ТЕХНИКА,  
ОБОРУДОВАНИЕ



**ПОДШИПНИКИ**



**УКРСВАРКА**

ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ  
И МАТЕРИАЛЫ



**ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНОЕ  
СКЛАДСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**



**УКРЛИТЬЕ**

Генеральный  
информационный партнер:

**ОБОРУДОВАНИЕ  
ИНСТРУМЕНТ**  
для профессионалов

Технический партнер:

**RentMedia**

**ufi**  
Approved  
Event



**ОРГАНИЗАТОР**  
Международный выставочный центр  
**ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:**  
Украинской Национальной Компании  
"Укрстанкоинструмент"

**24-27**  
**НОЯБРЯ**



+38 044 201-11-65, 201-11-56, 201-11-58  
e-mail: [lilia@iec-expo.com.ua](mailto:lilia@iec-expo.com.ua)  
[www.iec-expo.com.ua](http://www.iec-expo.com.ua)  
[www.tech-expo.com.ua](http://www.tech-expo.com.ua)

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР**  
Украина, Киев, Броварской пр-т, 15  
М "Левобережная"