ISSN 2518-1653 (online)
vestnik.donntu.org

ДОНЕЦКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ВЕСТНИК

№3 (17) 2019 г.

IPD

ipd.donntu.org

ИННОВАЦИОННЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ДОНБАССА



НАУЧНЫЕ ИЗДАНИЯ Донецкого национального технического университета



Международный научно-технический журнал «Вестник Донецкого национального технического университета»

Свидетельство о регистрации СМИ ААА №000133, выдано 27.05.2017 г.
Приказ МОН ДНР № 1144 от 07.11.2017 г. о включении в перечень рецензируемых научных изданий ВАК ДНР
Лицензионный договор с РИНЦ № 425-07/2016 от 14.07.2016 г.

Периодичность – 4 раза в год

Научные направления:
05.02 Машиностроение и машиноведение;
05.05 Транспортное, горное и строительное машиностроение;
05.09 Электротехника;
05.16 Металлургия и материаловедение;
05.17 Химическая технология.

Подробная информация - http://vestnik.donntu.org



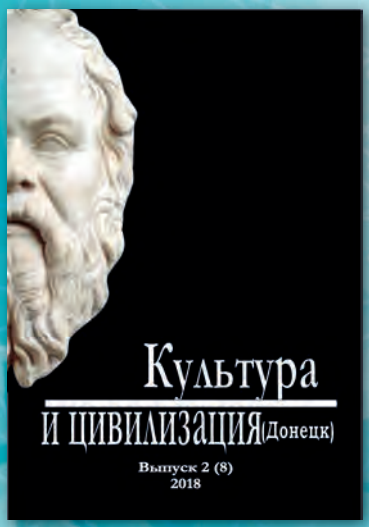
Международный сборник научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения»

Свидетельство о регистрации СМИ ААА №000125 от 20 апреля 2017 г. (сетевое издание)
Свидетельство о регистрации СМИ ААА №000147 от 20 июня 2017 г. (печатное издание)
Приказ МОН ДНР №744 от 24.07.2017 г. о включении в перечень рецензируемых научных изданий ВАК ДНР
Лицензионный договор с РИНЦ № 177-04/2013 от 12.04. 2013 г.

Периодичность – 4 раза в год

Научные направления:
05.02 Машиностроение и машиноведение.

Подробная информация - http://ptsm.donntu.org



Научный журнал «Культура и цивилизация (Донецк)»

Свидетельство о регистрации СМИ ААА №000143 от 20.06.2017 г.
Приказ МОН ДНР №1134 от 01.11.2016 г. о включении в перечень рецензируемых научных изданий ВАК ДНР
Лицензионный договор с РИНЦ № 425-07/2016 от 14.07.2016 г.

Периодичность – 4 раза в год

Научные направления:
09.00 Философские науки;
23.00 Политология.

Подробная информация - http://cic.sgi.donntu.org

Вестник ДонНТУ №3(17)'2019

международный научно-технический журнал

Учредитель и издатель: *ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)*

Главный редактор
Маренич К.Н. (д.т.н., проф.)*

Зам. главного редактора
Булгаков Ю.Ф. (д.т.н., проф.)*

Ответственный секретарь
Сотников А.Л. (д.т.н., доц.)*

Редакционный совет:
Артюх В. Г. (д.т.н., проф.)
Беломеря Н.И. (к.т.н., доц.)*
Бершадский И.А. (д.т.н., проф.)*
Бирюков А.Б. (д.т.н., проф.)*
Бутузова Л.Ф. (д.х.н., проф.)*
Высоцкий Ю.Б. (д.х.н., проф.)*
Горбатко С.В. (к.т.н., доц.)*
Горбатюк С. М. (д.т.н., проф.)*
Дедовец И.Г. (к.т.н., доц.)*
Еронько С.П. (д.т.н., проф.)*
Захаров Н.И. (д.т.н., доц.)*
Ковалев А.П. (д.т.н., проф.)*
Кожевникова И.А. (д.т.н., доц.)
Кондрахин В.П. (д.т.н., проф.)*
Кононенко А.П. (д.т.н., проф.)*
Куренный Э.Г. (д.т.н., проф.)*
Ченцов Н.А. (д.т.н., доц.)*
Шабаев О.Е. (д.т.н., проф.)*
Шаповалов В.В. (д.х.н., проф.)*
Яковченко А.В. (д.т.н., проф.)*
** - штатные сотрудники учредителя*

Адрес: 28301, г. Донецк, ул. Артема, 58
Телефон +380 (62) 301-07-89
Эл. почта: vestnikdonntu@gmail.com
Интернет: vestnik.donntu.org

Вестник ДонНТУ
2019. №3(17)

ISSN 2518-1653 (online)

Издается с января 2016 г.
Периодичность издания: 4 раза в год

Свидетельство
о государственной регистрации
Серия ААА № 000133 от 27.05.2017

За содержание статей и их оригинальность несут ответственность авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов. За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

Подписано к печати
по решению Ученого Совета
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»
Протокол №7 от 25.10.2019

Формат 60×84 1/8. Заказ 0919.
Изд-во «Донецкая политехника», 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Е.М. Арефьев, А.П. Кирьян
Определение диапазона частот настройки виброочистителей шахтных ленточных конвейеров 3

Н.Г. Афендиков, А.В. Шендрик
Статистическое оценивание показателей надежности гидравлических приводов проходческих комбайнов избирательного действия 8

А.П. Кононенко, Р.И. Божко
Рациональная область применения нагнетательных эрлифтных установок с воздухоструйными компрессорами 17

В.Б. Малеев, Н.И. Скорынин, А.А. Кудрявцев
Алгоритмы автоматизированного управления запуском и остановом эрлифтного гидроподъема 26

Н.В. Савенков, В.Г. Скрипкарь, Л.Э. Энтина
Повышение топливной экономичности городских автобусов на основе исследования режимов движения на маршрутах 34

О.Е. Шабаев, В.Г. Нечепаев, Е.Ю. Степаненко, П.П. Зинченко
Установление зависимости погрузочной способности шнековых очистных комбайнов от их режимных параметров на основе модельных и натурных экспериментов 42

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

А.М. Брюханов, О.А. Демченко, Л.А. Муфель, К.Н. Маренич
Локальные заземляющие сети – новое решение в обеспечении безопасной эксплуатации систем подземного высоковольтного электроснабжения 51

К.Н. Маренич, Е.С. Дубинка
Двухскоростной асинхронный двигатель как объект реализации функции защитного подавления обратного энергетического потока 59

О.К. Маренич, Е.В. Золотарѐв
Применение средств дополнительного автоматического разрыва цепи тока короткого замыкания как средство повышения ресурса автоматического выключателя шахтной участковой трансформаторной подстанции 69

А.А. Троянский, В.И. Заика, А.Д. Рябцев
Противофлокенная термообработка литых заготовок электрошлакового переплава 78

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

В.Н. Шевкопляс, Л.Ф. Бутузова, В.А. Колбаса, Г.Н. Бутузов
Дериватографические исследования углеобразователей и углей ряда метаморфизма 82

ИНФОРМАЦИЯ

Требования к статьям, направляемым в редакцию 92

Информация об издании

– На страницах журнала публикуются научные статьи фундаментального и прикладного характера, информация о конференциях, семинарах и выставках; освещается деятельность ведущих научно-исследовательских и проектных институтов, промышленных предприятий и коммерческих организаций, технопарков.

– Журнал оказывает информационную поддержку в продвижении на рынок конкурентоспособной наукоемкой продукции, проектов, научно-технических разработок и высоких технологий в различных областях промышленности.

– Журнал распространяется бесплатно в эл. виде посредством сети Интернет; принимает участие в научных конференциях и выставках.

– Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Интернет: elibrary.ru

– Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий Высшей аттестационной комиссии (ВАК) ДНР. Интернет: vak.mondnr.ru

– Редакция журнала принимает к публикации и осуществляет рецензирование рукописей статей по химическим и техническим наукам и следующим группам специальностей: 05.02 – Машиностроение и машиноведение; 05.05 – Транспортное, горное и строительное машиностроение; 05.09 – Электротехника; 05.16 – Металлургия и материаловедение; 05.17 – Химическая технология.

VESTNIK DONNTU №3(17)'2019

international scientific-technical journal

Founder and publisher *Donetsk National Technical University (Donetsk)*

Editor-in-chief
Marenych K.N. (Dr. Sci. (Eng.), Prof.)*

Deputy Editor-in-chief
Bulgakov Y.F. (Dr. Sci. (Eng.), Prof.)*

Executive secretary
Sotnikov A.L. (Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof.)*

Editorial council:
Artyukh V. G. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)
Belomerya N. I. (Cand. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Bershadsky I. A. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Biryukov A.B. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Butuzova L.F. (Dr. Sci. (Chem.), Prof.)*
Vysotsky Y.B. (Dr. Sci. (Chem.), Prof.)*
Gorbatko S. V. (Cand. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Gorbatyuk S. M. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)
Dedovets I.G. (Cand. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Eron'ko S.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Zaharov N. I. (Dr. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Kovalev A.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Kozhevnikova I. A. (Dr. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)
Kondrahin V.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Kononenko A.P. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Kurennyiy E. G. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Chentsov N. A. (Dr. Sci. /Eng./, Assoc. Prof.)*
Shabayev O.E. (Dr. Sci. /Eng./, Prof.)*
Shapovalov V.V. (Dr. Sci. /Chem./, Prof.)*
Yakovchenko A.V. (Dr. Sci. /Chem./, Prof.)*
** - staff members of the founder*

Address: 283001, Donetsk, 58, Artema St.
Phone +380 (62) 301-07-89
E-mail: vestnikdonntu@gmail.com
Internet: vestnik.donntu.org

Vestnik DonNTU
2019. No.3(17)

ISSN 2518-1653 (online)

Published since January, 2016
Publication frequency: 4 times a year

Certificate of State Registration
Series AAA No. 000133
dated 27.05.2017

The content and originality of the articles is the author's responsibility. The editorial opinion may not necessarily represent the views of the authors. The content of advertising material is the advertiser's responsibility.

Subscribed to print
on the recommendation
of the Academic Council
Donetsk National Technical University
Protocol No.7 dated 25.10.2019

Format 60×84 1/8. Order 0919
Publishing house
"Donetsk Polytechnic", 2019

CONTENTS

TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION ENGINEERING

E.M. Arefjev, A.P. Kiryan
Determination of frequency range settings of vibration cleaners for mine belt conveyors 3

N.G. Afendikov, A.V. Shendrik
Statistical estimation of reliability indices of hydraulic actuators of selective action roadheaders 8

A.P. Kononenko, R.I. Bozhko
Rational application field of injection air-lift units with air-jet compressors 17

V.B. Maleyev, N.I. Skorynin, A.A. Kudryavtsev
Automated control algorithms of starting and stopping the hydraulic airlift 26

N.V. Savenkov, V.G. Skrypkar, L.E. Entina
Improving the fuel economy of the city buses based on the analysis of driving modes on the passenger routes 34

O.E. Shabaev, V.G. Nechepaev, E.U. Stepanenko, P.P. Zinchenko
Determination of loading capacity dependence of auger cutter-loaders on their operating parameters based on model and full-scale experiments 42

ELECTRICAL ENGINEERING

A.M. Bryukhanov, O.A. Demchenko, L.A. Mufel, K.N. Marenich
Local earthing networks – the new solution to ensure safe operation of the underground high-voltage power supply systems 51

K.N. Marenich, E.S. Dubinka
The dual stator-winding asynchronous machine as an object of realization the function of protective suppression of reverse energy flow 59

O.K. Marenich, Ye.V. Zolotaryov
The use of additional automatic circuit break facilities for short circuit current as a means of improving the circuit breaker resource of a mine transformer substation 69

O.A. Troyanskiy, V.I. Zaika, A.D. Ryabtsev
Anti-flake heat treatment of cast billets of electroslag remelting 78

CHEMICAL TECHNOLOGY

V.N. Shevkoplyas, L.F. Butuzova, V.A. Kolbasa, G.N. Butuzov
Derivatographical studies of coal precursors and coals of metamorphism range 82

INFORMATION

Requirements for the papers submitted to the Editorial office 92

Publication Information

– The journal publishes research papers of fundamental and applied nature, information on conferences, seminars and exhibitions. It covers the activities of the leading research and design institutes, industrial and commercial companies and technology parks.
– The journal provides information support for the marketing of competitive high-tech products, projects, scientific and technical developments and high technologies in various fields of industry.
– The journal is distributed free of charge in electronic format via the Internet. It provides informational support and participates in International scientific conferences and exhibitions.
– The journal is included into the Russian Index of Science Citation (RISC). Internet: elibrary.ru
– The journal is included in the list of peer-reviewed scientific publications of the Higher Attestation Commission (VAK) of the DPR. Internet: vak.mondnr.ru
– The editorial accepts for publication and reviews manuscripts on chemical and technical sciences, and the following groups of specialties: 05.02 – Engineering and engineering science; 05.05 – Transport, mining and construction engineering; 05.09 – Electrical engineering; 05.16 – Metallurgy and materials science; 05.17 – Chemical technology.

УДК 622.61

Е.М. Арефьев /к.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)
А.П. Кирьян
ГОУ ВПО «Академия гражданской защиты» (Донецк)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ НАСТРОЙКИ ВИБРООЧИСТИТЕЛЕЙ ШАХТНЫХ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

Выполнен анализ спектра частот настройки виброочистителей для ленточных конвейеров, применяемых в угольной промышленности, с учетом допустимых условий их эксплуатации. Определена ширина диапазона частот настройки для рассмотренных моделей конвейеров.

Ключевые слова: *ленточный конвейер, вибрационный очиститель, очистка ленты.*

Постановка проблемы

В сложных горнотехнических и горно-геологических условиях эффективность работы ленточных конвейеров резко снижается из-за интенсивного прилипания влажной горной массы к рабочим поверхностям конвейера и зашты-бовки подконвейерного пространства просыпью транспортируемого груза, что вызывает необходимость периодической его очистки.

Перспективными являются очистители, реализующие бесконтактное вибрационное воздействие на загрязняющую примазку благодаря следующим преимуществам: исключение взаимного износа рабочей обкладки конвейерной ленты и рабочего органа очистителя, выведение рабочего органа очистителя из загрязненной зоны, меньшая зависимость от применяемых методов стыковки лент. Однако, несмотря на преимущества, виброочистка не получила широкого применения.

В связи с этим представляют научный интерес дальнейшие исследования вибрационных средств очистки конвейерных лент.

Анализ последних исследований и публикаций

Согласно проведенным исследованиям [1] установлено, что максимумы ускорений ленты в поперечном направлении, обеспечивающие максимальное качество виброочистки достигаются при частоте возмущения составляющей от 0,8 до 1,0 от собственной частоты ленты. В работе [2] В.Д. Зиневич и Ю.А. Пертен условием эффективности виброочистки также определяют частоту колебаний возмущающей силы равную и выше резонансной.

Однако проблема определения диапазона рациональных рабочих частот виброочистки (соответствующих резонансному режиму) для различных типов конвейеров в литературе [1,2] не рассматривалась.

Цель (задачи) исследования

Определение диапазона частот виброочистителей для эффективной очистки лент различных типов шахтных конвейеров.

Основной материал исследования

Согласно исследованиям, проведенным в работах [1,2], достаточным условием для обеспечения высокого качества виброочистки является совпадение частот собственных колебаний ленты и возмущающего воздействия, т.е. резонансный режим работы.

Вибрационный очиститель конвейерной ленты имеет следующую конструкцию (рис. 1). На раме ленточного конвейера 1 шарнирно закреплена рама вибрационного очистителя 2. Роликовый рабочий орган очистителя 3 взаимодействует с лентой 4, лежащей на роликоопоре 5. Колебания очистителя создаются электромагнитным вибровозбудителем, реализующим силу F. Расстояние от оси поворота очистителя до точки приложения силы пружины l_n.

Виброочиститель может быть рассмотрен как одномассовая система, совершающая крутильные колебания. Собственная частота виброочистителя вычисляется из следующего выражения [3]:

$$f_{0в} = \sqrt{\frac{c \cdot l_n^2}{I_0}},$$

где c – коэффициент жесткости пружин подвески; I_0 – момент инерции рамы очистителя с закрепленными на ней элементами относительно оси поворота.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

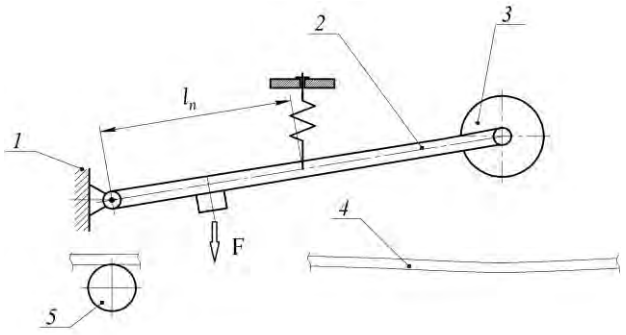


Рис. 1. Схема вибрационного очистителя конвейерной ленты

Для обеспечения качественной очистки ленты путем выбора соответствующих параметров виброочистителя должно быть реализовано совпадение данной частоты с собственной частотой ленты.

Собственная частота ленты определялась в соответствии с приведением ее распределенной массы к сосредоточенной, имеющей эквивалентный коэффициент жесткости [3]:

$$f_{0л} = \sqrt{\frac{12S_{рб}}{q_л l^2}},$$

где $S_{рб}$ – натяжение ленты в месте очистки (на разгрузочном барабане); $q_л$ – погонная масса ленты; l – длина пролета ленты в месте очистки.

Таким образом, собственная частота колебаний ленты зависит от погонной массы ленты $q_л$, длины пролета ленты l и натяжения ленты $S_{рб}$ в месте очистки.

Анализ конструкций конвейеров 1Л80, 1ЛТ80, 2Л80, 3Л80, 1ЛТ80, 1Л80УК, 1Л80УК-01, 1ЛТ800К, 1ЛТП800К, 1Л800Д, 1ЛТП800Д, 1Л100К 1Л100, 1ЛУ100, 1ЛБ100, 2ЛУ100, 2ЛЛ100, 1Л1000, 1Л1000-01, 1Л100У-01, 2ЛТ100У, 2Л100У, 2Л100У-01, 2ЛТ100У-01, 3Л100У, 2Л1000, 3Л1000, 1ЛУ120, 2ЛУ120А, 2ЛУ120Б, 2ЛУ120В, 4Л1200Д, 4Л1400Д [4] показал, что расстояние l лежит в пределах 1,5…2,5 м.

Погонная масса резинотканевых лент [5] в зависимости от типа, количества прокладок и ширины изменяется в пределах 8,6…20,3 кг/м, резинотросовых – 20,5…48 кг/м.

Натяжение ленты в точке очистки $S_{рб}$ зависит от конкретных условий работы ленточного конвейера и может быть определено тяговым расчетом. На величину $S_{рб}$ определяющее влияние оказывают длина конвейера L, угол его установки β и эксплуатационная производительность Q, а также место установки привода (для бремсбергового конвейера).

При определении параметров виброочистителя для конкретного типа конвейеров необходимо рассматривать весь спектр возможных условий его эксплуатации. Результатом такого подхода будет диапазон (спектр) частот настройки виброочистителя, для получения которого используем метод Монте-Карло [6,7,8]. Алгоритм исследования следующий:

1. Задание параметров конвейера.

2. Моделирование массивов из n значений случайных величин L_i, Q_i, β_i (i=1…n) допустимых условий эксплуатации конвейера, а также места установки привода (для бремсбергового конвейера).

3. Тяговый расчет конвейера и определение натяжения ленты в точке установки очистного устройства $S_{рб}$.

4. Расчет массива значений частоты настройки виброочистителя.

Задание возможных значений эксплуатационной производительности осуществляется по формуле:

$$Q_i = k_{Qi} Q_{\max},$$

где k_{Qi} – коэффициент использования производительности конвейера, k_{Qi}=0,6…1,0; $Q_{\max}$ – максимальная приемная способность конвейера.

Угол установки конвейера β_i может быть принят случайным образом в диапазоне допустимых углов с учетом статистических данных [9]. Для бремсберговых конвейеров случайным образом задается место установки привода – вверху или внизу (эти положения приняты равновероятными).

Длина конвейера может быть принята по формуле:

$$L_i = k_{Li} L_{\max},$$

где k_{Li} – коэффициент использования длины конвейера, k_L=0,6…1,0; $L_{\max}$ – максимальная длина конвейера.

Методику исследования можно описать следующим алгоритмом (рис. 2).

Для задания допустимой длины конвейера рассмотрим следующие расчетные случаи, соответствующие трем зонам работы конвейера:

– длина конвейера ограничена мощностью привода, режим работы привода тормозной;

– длина конвейера ограничена не мощностью привода, а его максимальной конструктивной длиной;

– длина конвейера ограничена мощностью привода, режим работы привода двигательный.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

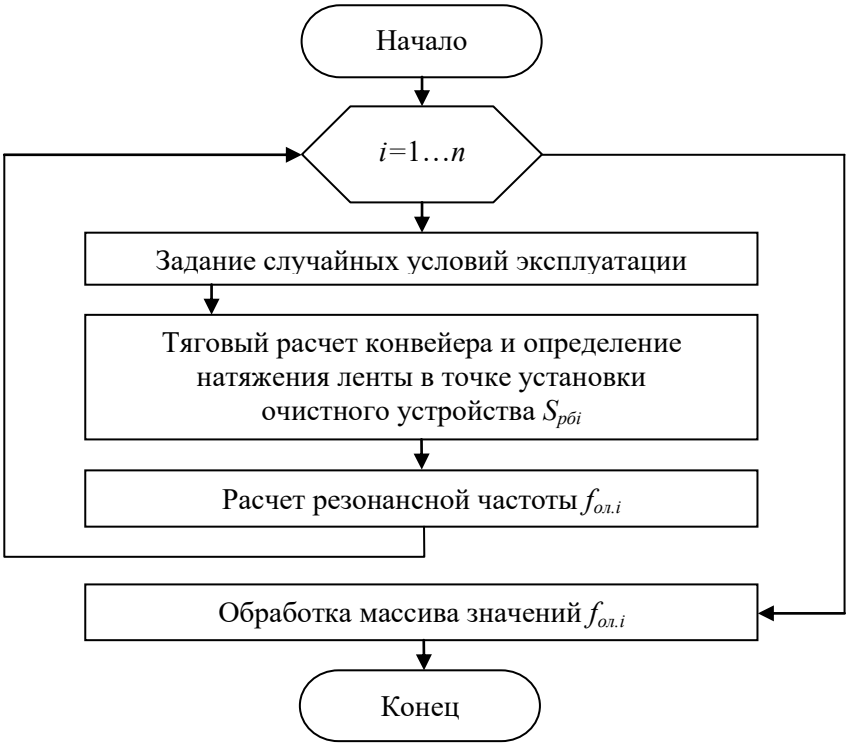


Рис. 2. Методика исследования конвейеров

Указанные расчетные случаи соответствуют трем зонам возможной работы конвейера, причем вторая зона работы конвейера соответствует как тормозному, так и двигательному режиму.

Для оценки режимов работы привода рассчитывается суммарный градиент сопротивления движению ленты на рабочей и груженой ветвях:

$$(\omega_{гpi}+\omega_{n0pi}),$$

здесь $\omega_{гpi}$ – градиент сопротивления движению груженой ветви:

$$\omega_{гpi}=(q_i+q_л+q'_p)\omega' k_c\cos\beta_i+(q_i+q_л)\sin\beta_i;$$

ω_{n0pi} – градиент сопротивления движению порожней ветви:

$$\omega_{n0pi}=(q_л+q''_p)\omega' k_c\cos\beta_i+q_л\sin\beta_i,$$

где $q'_p=G'_p/l'_p$, $q''_p=G''_p/l''_p$ – погонная масса вращающихся частей роликоопор, соответственно груженой и порожней ветвей; $G''_pG''_p$ – масса вращающихся частей роликоопор, соответственно для поддержания рабочей и порожней ветвей ленты [10]; l'_p, l''_p – расстояние между роликоопорами на груженой и порожней ветвях (расстояние l'_p при ширине ленты конвейера B=800, 1000 и 1200 мм соответственно равно 1,3; 1,2 и 1,2 м. Расстояние между роликоопорами порожней ветви равно двум расстояниям между роликоопорами груженой ветви $l''_p=2l'_p$); ω'– коэффициент сопротивления движению ленты, ω'= =0,03…0,04 [11]; $q_i=Q_i/3{,}6V$ – погонная масса груза на ленте; k_c – коэффициент, учитывающий местные сопротивления, k_c=1,1…1,5 [11].

Максимальная длина конвейера в заданных условиях:

$$L_{\max i}=\begin{cases}L_{Ni}, & \text{если } L_{Ni}<L_к;\\ L_к, & \text{если } L_{Ni}\ge L_к,\end{cases}$$

где L_{Ni} – максимально возможная длина конвейера по мощности привода N.

$$L_{Ni}=\begin{cases}\dfrac{1000N\eta}{k_м Vg((q_i+2q_л+q'_p+q''_p)\omega' k_c\cos\beta_i+q_i\sin\beta_i)};\\ \text{если } \omega_{гpi}+\omega_{n0pi}\ge 0,\\ \dfrac{1000N}{k_м Vg\eta\left|(q_i+2q_л+q'_p+q''_p)\omega' k_c\cos\beta_i+q_i\sin\beta_i)\right|},\\ \text{если } \omega_{гpi}+\omega_{n0pi}<0.\end{cases}$$

где V – скорость движения ленты конвейера; $k_м$ – коэффициент запаса мощности, $k_м$=1,1…1,2 [4]; q – ускорение свободного падения.

Поскольку исследуемый очиститель устанавливается непосредственно после разгрузочного барабана, то можно считать, что натяжение в месте очистки ленты равно натяжению в точке набегания ленты на разгрузочный ($S_{рбi}$) барабан, которое можно определить по выражениям:

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

$$S_{pбi}=\begin{cases}\max(S_{грi}^{\min},S_{сбб}^{\min}+W_{грi}),\text{ при}W_{0pi}<0\\ \text{и верхнем расположении привода;}\\ \max(S_{грi}^{\min},S_{сбб}^{\min}+W_{грi}+W_{n0pi}),\text{ при}W_{0pi}<0\\ \text{и нижнем расположении привода;}\\ S_{нб}=W_{0pi}e^{\mu\alpha}\cdot\left(e^{\mu\alpha}-1\right)^{-1},\text{ при }W_{0pi}\geq 0,\end{cases}$$

где $W_{грi}$ – сопротивление движению груженой ветви конвейера; W_{n0pi} – сопротивление движению порожней ветви конвейера; W_{0pi} – общее тяговое усилие конвейера; $S_{грi}^{\min}$ – минимальное натяжение на груженой ветви конвейера по условию максимального провеса ленты между роликоопорами; $S_{сбi}^{\min}$ – минимальное натяжение ленты в точке ее сбегания с приводного барабана по условию отсутствия пробуксовки:

$$S_{сбi}^{\min}=\begin{cases}\dfrac{|W_{0pi}|e^{\mu\alpha}k_m}{e^{\mu\alpha}-1},\text{ если }W_{0pi}<0;\\ \dfrac{W_{0pi}k_m}{e^{\mu\alpha}-1},\text{ если }W_{0pi}\geq 0,\end{cases}$$

где k_m – коэффициент запаса сил трения, k_m= =1,3… 1,5 [4]; $e^{\mu\alpha}$ – значение тягового фактора [4].

Исследования, проведенные для разных типов конвейеров, позволили выявить два характерных вида спектра частот настройки виброочистителя: 1) большинство частот сосредоточено в двух областях спектра (рис. 3), имеется «провал» в спектре частот (62,5 % рассматриваемых конвейеров); 2) большинство частот сосредоточено в одной области спектра (рис. 4), (37,5 % рассматриваемых конвейеров).

Для всех типов исследуемых конвейеров диапазон резонансных частот лежит в пределах от 7 до 310 $с^{-1}$ (303 $с^{-1}$), а спектр резонансных частот будет иметь вид, представленный на рис. 5.

Выводы

Установлено, что рациональная частота виброочистки определяется условиями эксплуатации конвейера (длина, угол установки, эксплуатационная производительность, место установки привода для бремсбергового конвейера) и его параметрами (тип ленты, мощность привода, скорость движения ленты и др.). Предложен оригинальный алгоритм для анализа спектра частот настройки виброочистителей для шахтных ленточных конвейеров с учетом допустимых условий их эксплуатации. В результате анализа установлено, что ширина диапазона частот настройки для рассмотренных моделей конвейеров находится в пределах от 7 до 310 $с^{-1}$ и составляет 303 $с^{-1}$.

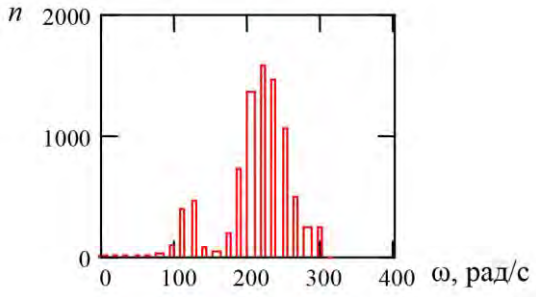


Рис. 3. Спектр резонансных частот для конвейера 1ЛТ100У

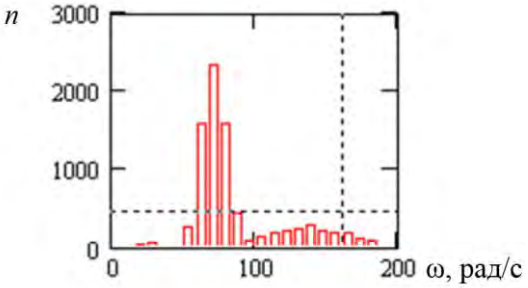


Рис. 4. Спектр резонансных частот для конвейера 3Л100У

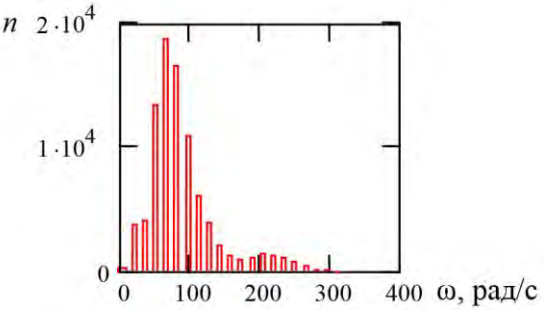


Рис. 5. Спектр резонансных частот для всех типов исследуемых конвейеров

Список литературы

1. Кондрахин, В.П. Установление закономерностей процесса вибрационной очистки конвейерной ленты / В.П. Кондрахин, Е.М. Арефьев // Перспективы развития глазами молодых ученых: Материалы VI научно-практической конференции «Донбасс-2020», 23-26.04.2012, Донецк. – Донецк: ДонНТУ, 2012. – С. 393-396.
2. Зиневич, В.Д. Вибрационная очистка конвейерной ленты / В.Д. Зиневич, Ю.А. Пертен // Горные машины и автоматика. – М.: ЦИТИ угля, 1961. – С. 33-39.
3. Исследование режимов работы вибрационного очистного устройства конвейерных лент / В.А. Будишевский и др. // Проблеми експлуатації обладнання шахтних стаціонарних установок: збірник наукових праць. – Донецьк: ВАТ «НДІГМ ім. М.М. Федорова», 2008-2009. – С. 383-395.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

4. Справочник по шахтному транспорту. Под ред. Г.Я. Пейсаховича, И.П. Ремизова. – М.: Недра, 1977. – 624 с.
5. Теоретические основы и расчеты транспорта энергоемких производств / В.А. Будишевский и др. Под общ. ред. д.т.н. В.П. Кондрахина. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – 216 с.
6. Application of direct simulation Monte Carlo method to ecological objects modeling. Modeling a tundra animals population / Д.А. Саранча и др. // 5th Conference of the European Socicty of the Mathematical and Theoretical Biology, 02-06.07.2002, Milano. – P. 118-226.
7. Kalos, M.H. Monte Carlo Methods / M.H. Kalos, P.A. Whitlock. – 2nd edition. – Wiley, 2008. – 211 p.
8. Kroese, D.P. Handbook of Monte Carlo Methods / D.P. Kroese, T. Taimre, Z.I. Botev. – Wiley, 2011. – 743 p.
9. Методика оценки и классификации показателей разрушаемости угольных пластов основных бассейнов СССР. Часть 2. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1978. – 60 с.
10. Расчеты и проектирование транспортных средств непрерывного действия / А.И. Барышев и др. Под ред. проф., д.т.н. В.П. Кондрахина. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – 689 с.
11. Шахтный транспорт / А.И. Будишевский и др. Под ред. проф., д.т.н. В.П. Кондрахина. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – 49 с.

E.M. Arefjev /Cand. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)
A.P. Kiryan
Academy of Civil Protection (Donetsk)

DETERMINATION OF FREQUENCY RANGE SETTINGS OF VIBRATION CLEANERS FOR MINE BELT CONVEYORS

Background. *In severe mining conditions, the efficiency of belt conveyors depends on the quality of cleaning tapes. Vibration cleaners are promising due to the following advantages: the elimination of mutual wear of the working plate of the conveyor belt and the working body of the cleaner; the removal of the working body of the cleaner from the contaminated area; less dependence on the methods used for joining the belts. In this regard, the study of vibration cleaners for conveyor belts is of scientific interest.*
Materials and/or methods. *The rational frequency of vibration cleaning determined by the operating conditions of the conveyor (length, angle of installation, operational performance, place of installation of the drive for the inclined conveyor) and its parameters (a type of belt, drive power, belt speed).When determining the parameters of the vibration cleaner for a particular type of conveyor, it is necessary to consider the entire range of possible conditions of its operation. The result of this approach is the frequency range (spectrum) of the setting of the vibration cleaner, for which the Monte Carlo method used.*
Results. *Studies carried out for different types of conveyors revealed two specific types of the frequency range of vibration cleaner tuning. 1. Most of the frequencies concentrated in two spectral regions, there is a "failure" in the frequency spectrum (62.5 % of the considered conveyors). 2. Most of the frequencies concentrated in one spectral region (37.5 % of the considered conveyors). For all types of conveyors under study, the range of resonant frequencies ranges is from 7 to 310 s^{-1}.*
Conclusion. *An original algorithm proposed to analyze the spectrum of frequency settings of vibration cleaners for mine belt conveyors, taking into account the permissible conditions of their operation.*

Keywords: *belt conveyor, vibration cleaner, belt cleaning.*

Сведения об авторах

Е.М. Арефьев
SPIN-код: 2201-2812
Телефон: +380 (71) 387-34-15
Эл. почта: elcross@mail.ru

А.П. Кирьян
Телефон: +380 (71) 387-34-15
Эл. почта: andrei-kiryan@mail.ru

Статья поступила 10.06.2019 г.
© Е.М. Арефьев, А.П. Кирьян, 2019
Рецензент д.т.н., проф. А.П. Кононенко

УДК 622.223.83

Н.Г. Афендиков /к.т.н./, А.В. Шендрик
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ ПРОХОДЧЕСКИХ КОМБАЙНОВ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

Приведены результаты производственных исследований надежности девяти горнопроходческих комбайнов КСП-32 в условиях восьми шахт ПО «Макеевуголь» при проведении подготовительных выработок в различных горно-геологических и горнотехнических условиях. С использованием аппарата теории вероятностей установлены математические ожидания, дисперсии, среднеквадратические отклонения, а также законы плотности вероятности времени наработки до отказов и времени восстановления.

Ключевые слова: *горнопроходческие комбайны избирательного действия, надежность, наработка до отказа, время восстановления.*

Постановка проблемы

Комбайновый способ проходки горных выработок в шахтах и рудниках является более прогрессивным в сравнении с буровзрывным. Поскольку он позволяет совместить во времени операции, связанные непосредственно с разрушением и погрузкой горной массы. Однако эффективность применения проходческих комбайнов во многом определяется их надежностью.

Высокие показатели надежности проходческих комбайнов избирательного действия, как известно, обеспечиваются на нескольких этапах – при проведении научно-исследовательских и проектно-конструкторских работах, при заводском изготовлении и при эксплуатации. Для разработки рекомендаций по повышению надежности на этих этапах необходимо знание статистических показателей надежности, полученных в реальных шахтных условиях.

Исследования в области эксплуатации проходческих комбайнов избирательного действия показали [1], что среди всех систем горных машин гидросистемы являются наименее надежными, и значительное количество простоев горной техники происходит по причине отказов элементов гидроприводов.

Также известно, что за весь срок эксплуатации проходческого комбайна гидросистема как минимум один раз подвергается капитальному ремонту или замене наиболее нагруженных узлов гидросистемы. Поэтому для повышения качества и надежности комбайнов, в первую очередь, очень важно получение статистических оценок показателей надежности гидравлических приводов.

Анализ последних исследований и публикаций

Для оценки фактического технического состояния и контроля качества проходческих комбайнов (их основных систем и подсистем) необходимы данные по показателям надежности. В соответствии с [2] нормативными документами, установлен перечень параметров, характеризующих надежность машин (безотказность, долговечность, сохраняемость, ремонтопригодность), параметров безопасности оборудования (ресурс, срок службы, наработка до капитального ремонта).

В связи с тем, что на надежность машин оказывает влияние большое число конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, рассчитать ее практически невозможно. Надежность можно оценить только с использованием теории вероятностей и математической статистики [3], причем показатели надежности при этом должны [4] определяться за период не менее двух лет эксплуатации в реальных шахтных условиях.

Основными показателями надежности являются вероятность безотказной работы, т. е. вероятность того, что в заданный промежуток времени отказ изделия не возникает. Оценка фактических показателей надежности проходческих комбайнов производилась в работах [5,6,7] при эксплуатации комбайнов типов ГКПС, КП-20 и КП-21 в условиях Кузнецкого угольного бассейна и на шахтах ПО «Гуковуголь». Работ по фактическому определению показателей надежности проходческих комбайнов, оснащенных мощными приводами, при работе в горно-геоло-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

гических и горнотехнических условиях шахт Донецкого бассейна проведено недостаточно. Поэтому в настоящей работе поставлена цель исследований для восполнения этого пробела.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящего исследования является получение статистических данных показателей надежности элементов систем проходческих комбайнов избирательного действия при их эксплуатации. Показатели надежности необходимы для определения рациональной периодичности проведения технических обслуживаний и ремонтов, а также определения необходимого количества и номенклатуры запасных частей для оперативного восстановления проходческих комбайнов после отказов.

Для достижения поставленной цели получения информации о показателях надежности проходческих комбайнов избирательного действия типа КСП-32 в настоящей работе поставлены следующие задачи: проанализировать данные об отказах элементов систем проходческих комбайнов в реальных шахтных условиях, полученных из регистраций, выполненных диспетчерскими и электромеханическими службами шахт; выполнить специальные выборочные наблюдения при эксплуатации комбайнов для сравнения и критического анализа данных с данными из шахт.

Основной материал исследования

Для получения полных и достоверных данных о надежности проходческих комбайнов и для разработки на основе этих данных эффективных мер по повышению надежности в трех периодах – при проектировании, изготовлении и при эксплуатации оборудования, необходимы сведения о количестве и характере отказов, возникших в рассматриваемое время эксплуатации. Поэтому в соответствии с работами [8,9] запланирован пассивный эксперимент при эксплуатации проходческих комбайнов в шахтных условиях.

Входными контролируемыми, но не управляемыми факторами при проведении этих экспериментов являлись следующие параметры: тип, крепость и абразивность горных пород, сечения и длины проводимых выработок. Выходными факторами приняты значения наработок до отказов, количество отказов и значения времени восстановления.

Задача планирования сводилась к определению репрезентабельной выборки комбайнов, обеспечивающей достоверность полученных результатов для совокупности рассматриваемого типа комбайнов, а также к определению оптимальной организации сбора информации и выбору методов обработки результатов наблюдений.

Основным преимуществом данных об отказах, полученных в шахтных условиях эксплуатации, является то, что в этом случае наиболее полно учитываются горно-геологические условия работы комбайнов и достаточно полно учитывается влияние на надежность режимов работы, влияние конструкции, технологии изготовления машин и качество управления при их работе.

В соответствии с планом проведения исследований отказы элементов механических и гидравлических систем подразделялись на: ремонтируемые (замена резиновых уплотнений, манжет, очистка сапунов, заливка и замена масла редукторов и рабочей жидкости гидросистемы до требуемого уровня, очистка сапунов), неремонтируемые (замена элементов фильтров, гибких рукавов высокого давления) и условно неремонтируемые (ремонт гидроцилиндров, гидрозамков, обратных клапанов, предохранительных клапанов и других элементов гидросистем, которые не ремонтируются в подземных условиях, но ремонтируются после выдачи на дневную поверхность в специализированных ремонтных мастерских или на ремонтных заводах). Замены изношенных и поломанных резцов на исполнительных органах комбайнов в данном исследовании не фиксировались как отказы.

Статистическая информация получена из регистраций выходов из строя комбайнов КСП-32 диспетчерскими и электромеханическими службами шахт ПО «Макеевуголь», которые производились на восьми предприятиях (табл. 1).

Табл. 1. Шахты ПО «Макеевуголь», на которых получены статистические данные о надежности комбайнов КСП-32

№ п/п	Наименование шахты	Заводской № комбайна КСП-32	Длина проведенных выработок на шахте, м
1	Имени В.М. Бажанова	263	2122
2	Калиновская-Восточная	268	885
3	Чайкино	336	962
4	Холодная балка	323	1406
5	Имени С.М. Кирова	293	1445
6	Иловайская	295	1166
7	Бутовка	246	3119
8		123	1405
9	Северная	317	2363

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

В диспетчерских журналах и электромеханических журналах учета отказов фиксируется время всех остановок проходческого комбайна, их причины и проведенные работы.

Следует отметить, что записанная в журналах диспетчерских и электромеханических служб информация в большой степени зависит от добросовестности и квалификации обслуживающего ремонтного персонала. Поэтому в настоящей работе проводились и специально контролируемые наблюдения при эксплуатации проходческих комбайнов. Затем данные, полученные при специальных наблюдениях, и данные, полученные из журналов шахт, сравнивались между собой для установления их сходимости.

На рис. 1 представлены графики, на которых приведены три периода эксплуатации комбайнов – А, Б и В. Период А обозначает время, при котором рассматриваемые машины уже работали, но пассивный эксперимент с ними еще не проводился. К таким машинам относятся комбайны № 1, № 6, № 7 и № 9. Период Б обозначает время, при котором производились наблюдения за работой всех комбайнов от № 1 до № 9. Период В обозначает время, при котором наблюдения за работой комбайнов уже прекратили, но проходческие комбайны продолжали работать некоторое время. К таким комбайнам относятся машины № 1, № 6 и № 7.

В связи с тем, что неучет времени работы комбайнов в периодах А и В приводит к снижению достоверности показателей их фактической надежности, в работе использован математический аппарат [10,11,12], который позволяет учитывать распределение выборок при цензурировании справа (учет работы комбайнов до начала пассивного эксперимента) и при цензурировании слева (учет работы комбайнов после окончания пассивного эксперимента).

Во время сбора статистических данных по надежности работы девяти комбайнов КСП-32 на шахтах, приведенных в табл. 1, при суммарной проходке более 13,5 км горных выработок в различных горно-геологических условиях, выявлены различные неисправности исполнительных органов и приводов исполнительных органов, питателей, конвейеров, ходовых частей, маслобака, магистральных трубопроводов, систем управления, подсистем подъема, поворота и телескопа исполнительных органов, а также корпусов комбайнов.

Результаты этих наблюдений по выявлению неисправностей комбайнов КСП-32 приведены в табл. 2.

В табл. 3 приведены сведения о количестве отказов подсистем и групп подсистем девяти проходческих комбайнов за время работы более двух лет. При этом в таблице разделены данные об отказах по механическим и гидравлическим составляющим подсистем.

Из данных, приведенных в табл. 3, следует, что число отказов гидравлических подсистем составляет 78 % от всех отказов, зафиксированных при работе девяти проходческих комбайнов. Число отказов механических систем при этом составляет 22 %. Следует отметить, что в этих данных не учитывались отказы электрических систем комбайнов. Такое распределение числа отказов обусловливается двумя факторами. Во-первых, в проходческом комбайне типа КСП-32 количество гидравлических подсистем, узлов и элементов значительно больше, чем механических и электрических подсистем, узлов и элементов. Во-вторых, надежность гидравлической системы комбайна значительно ниже, чем надежность механической системы.

Наибольшее число отказов механических систем приходится на конструкции конвейеров, а наибольшее число отказов гидравлических систем приходится на подсистемы поворота, подъема и телескопа исполнительного органа.

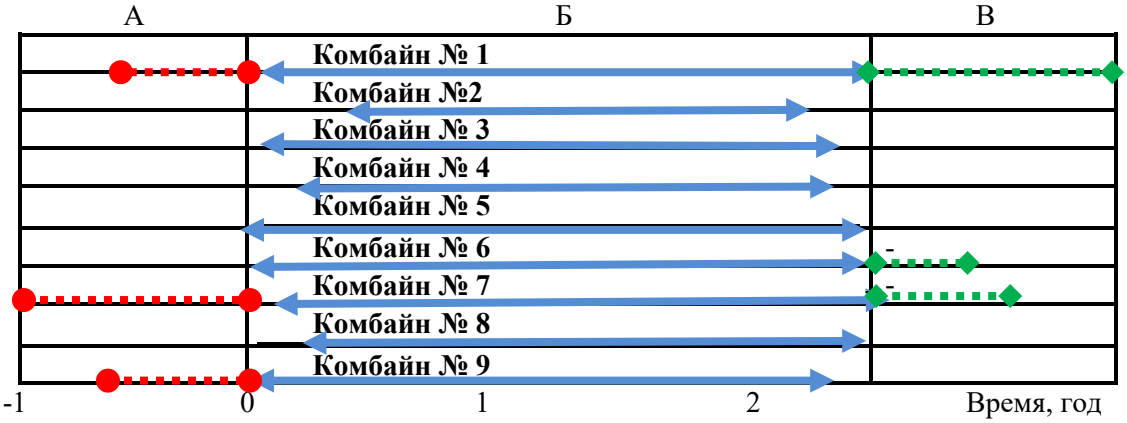


Рис. 1. Временные графики работы исследованных проходческих комбайнов в 3-х периодах: *А* – до проведения пассивного эксперимента; *Б* – во время проведения эксперимента; *В* – после окончания эксперимента

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Табл. 2. Выявленные неисправности комбайнов КСП-32

№ п/п	Виды неисправностей	№ п/п	Виды неисправностей
1	2	3	4
	Исполнительные органы и приводы исполнительных органов		
1	Разрушение резцедержателей режущей коронки	5	Ослабление болтовых соединений корпусов исполнительного органа
2	Выход из строя форсунок системы орошения	6	Снижение уровней смазки в отсеках редуктора
3	Выход из строя двигателя исполнительного органа (2ЭДКОФВ 250LB4У2,5)	7	Ослабление затяжки винтовой стяжки клиновой опоры под электродвигателем исполнительного органа
4	Течь масла через уплотнения на выходном валу исполнительного органа	8	Выход из строя зубчатых колес и (или) подшипников редуктора исполнительного органа
	Гидропривод нагребающих лап		
9	Течь гидроцилиндров подъема питателя КСП-32.36.00.000А с гидрозамком	12	Поломка гибких листов конвейера
10	Засорение сапунов редукторов конвейера	13	Выход из строя электродвигателя конвейера (3ВР160S4)
11	Засорение сапунов редукторов питателя	14	Ослабление болтовых соединений секций стола питателя
	Гидропривод подъема-опускания стола питателя		
15	Снижение уровней смазки в редукторах питателя	17	Выход из строя гидроцилиндров питателя КСП-32.36.00.000В
16	Ослабление крепления гидромоторов питателя	18	Выход из строя гидромотора КСП-32.43.05.200 на питателе
	Конвейеры		
19	Поломка редукторов приводов конвейеров	21	Выход из строя гидроблока конвейера КСП-42.09.46.000
20	Выход из стоя гидроцилиндра подъема конвейера КСП-32.40.01.000 А	22	Выход из строя гидроцилиндра поворота конвейера КСП-33.03.01.000А
23	Выход из строя траков	28	Выход из строя зубчатых передач и подшипников редукторов
24	Заклинивание опорных катков ходовых тележек	29	Недопустимое состояние качества смазки в редукторах
25	Снижение уровней смазки в редукторах	30	Снижено натяжение траковой цепи
26	Выход из строя винтов натяжения	31	Износ кулачков на тормозах
27	Ослабло крепления ходовых тележек	32	Ослабло крепления катков
	Гидроприводы хода правые и левые		
33	Выход из строя гидромотора КСП-32.43.05.200 на ходовой тележке	36	Выход из строя гидроблока хода КСП-32.09.01.100А
34	Ослабление крепления гидромоторов КСП-32.43.05.200	37	Выход из строя гидроблока подпора хода КСП-33.09.04.000
35	Выход из строя гидроблока тормозного КСП-32.37.04.000		
	Гидроагрегат КСП-33.09.01.000 В, система управления, трубопроводы		
38	Выход из строя электродвигателя маслостанции (2ЭДКОФ 250М4У2,5)	44	Выход из строя гидроблока управления КСП-32.37.10.000
39	Выход из строя насосов шестеренных НШ50М-4 и НШ10-3 на приводе маслонасосов КСП-33.09.02.000	45	Выход из строя гидроблока тормозной КСП-32.37.04.000
40	Выход из строя устройства управления КСП-33.20.00.000	46	Выход из строя установки для закачки масла (АИУ90L4У2,5)
	Выход из строя гидроблока предохранительно-измерительного КСП-32.24.09.000А	47	Течь масла в соединениях металлических трубопроводов и рукавов высокого давления (РВД)

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Продолжение табл. 2

1	2	3	4
41	Течь масла по рукавам высокого давления (РВД)	48	Выход из строя фильтров 2ФГА-32.00.000-25
42	Ослабление крепления редуктора маслонасосов	49	Выход из строя насоса шестеренчатого НШ 10-3
43	Засорение сапуна 20, ОСТ2-Г45-74		
Подсистемы поворота, подъема и телескопа исполнительного органа			
50	Выход из строя гидроцилиндра подъема исполнительного органа КСП-32.16.00.000А	54	Выход из строя гидрозамка одностороннего с дросселем и обратным клапаном КП-32.00.01.200Б
51	Выход из строя гидроцилиндра телескопа КСП-32.33.00.000А	55	Выход из строя переключателя КСП-32.37.00.300
52	Выход из строя гидроблока предохранительно-измерительный КСП-32.24.09.000А	56	Выход из строя гидроблока конвейера КСП-22.29.05.000
53	Выход из строя гидроблока исполнительного органа КСП-32.09.04.000М	57	Выход из строя гидроцилиндра поворота исполнительного органа КСП-32.19.04.000А
	Гидропривод опор		
58	Ослабление крепления станции управления и гидробака	62	Ослабление соединения рамы корпуса комбайна с задней рамой
59	Ослабление крепления нижних крышек гидроопор	63	Увеличение люфта – качания верхней поворотной рамы исполнительного органа
61	Выход из строя гидроопор	64	Выход из строя гидроблока КСП-32.37.10.000

Эти подсистемы являются наиболее нагруженными из всех систем проходческого комбайна. Следует отметить, что в число отказов, приведенных в табл. 3, включены как нетрудоемкие в части восстановления отказы, такие как засорение сапунов редукторов, снижение уровней смазки в редукторах, течь рабочей жидкости из соединений трубопроводов, так и отказы, для устранения которых требуются значительные трудовые и материальные затраты.

Табл. 3. Сведения о количестве отказов подсистем проходческих комбайнов КСП-32

Наименование подсистем (групп подсистем) комбайнов	Механическая составляющая подсистем (групп подсистем) комбайнов		Гидравлическая составляющая подсистем (групп подсистем) комбайнов	
	количество отказов	%	количество отказов	%
Исполнительные органы и привода исполнительного органа	35	23	-	-
Гидропривод нагребающих лап	-	-	86	16
Гидропривод подъема опускания стола питателя	-	-	69	13
Механическая составляющая правых и левых ходовых частей	51	32	-	-
Конвейеры	72	45	43	8
Гидроприводы хода правые и левые	-	-	45	8
Гидроагрегат КСП-33.09.01.000 В, система управления, трубопроводы	-	-	82	15
Подсистемы поворота, подъема и телескопа исполнительного органа	-	-	152	28
Гидропривод опор	-	-	67	12
Всего:	158	100	544	100
Процент отказов механической и гидравлический систем от всех отказов комбайнов	-	22	-	78

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

В их число входит также замена гидродомкратов и гидромоторов после износовых отказов. Данные средних наработок между отказами и данные среднего времени восстановления приведены в табл. 4.

Эксплуатационные наблюдения за механической частью проходческих комбайнов КСП-32 и гидравлическими приводами показали, что распределения наработок на отказ и время восстановления гидравлических подсистем подчиняются экспоненциальному закону распределения (табл. 5 и рис. 2), на котором приведены функции плотности распределений наработок между отказами и функции плотности времени восстановления. Из данных табл. 5 и рис. 2 следует, что преобладающим законом плотности распределения времени наработки на отказы гидравлических подсистем (групп подсистем) проходческих комбайнов КСП-32 является экспоненциальный закон.

Экспоненциальный закон распределения свидетельствует о преобладании внезапных отказов с небольшими значениями времени безотказности над износовыми отказами со значительными значениями времени безотказности.

Следует отметить, что и плотности распределения времени восстановления также подчиняются экспоненциальным законам, которые характеризуются значительным преобладанием частоты небольших значений времени восстановления над длительными значениями.

Табл. 4. Данные о средних наработках на отказ и о средних затратах времени на восстановление

Наименование подсистем (групп подсистем) комбайнов	Механическая составляющая подсистем (групп подсистем) комбайнов		Гидравлическая составляющая подсистем (групп подсистем) комбайнов	
	средняя наработка на отказ, $T_{ср}$	среднее время восстановления, $\tau_{ср}$	средняя наработка на отказ, $T_{ср}$	среднее время восстановления, $\tau_{ср}$
Исполнительный орган и привод исполнительного органа	2002	15,1	-	-
Гидропривод нагребающих лап	-	-	813	4,2
Гидропривод подъема-опускания стола питателя	-	-	1014	3,3
Конвейеры	1372	6,5	1627	4
Механическая составляющая правых и левых ходовых частей	972	7,0	-	-
Гидроприводы хода правые и левые	-	-	1555	7
Гидроагрегат КСП-33.09.01.000 В, система управления, трубопроводы	-	-	853	4,5
Подсистема поворота, подъема и телескопа исполнительного органа	-	-	460	5,2
Гидропривод опор	-	-	1044	3,5

Табл. 5. Результаты статистической обработки информации о надежности гидравлических подсистем (групп подсистем) проходческих комбайнов типа КСП-32

Наименование подсистем (групп подсистем) проходческих комбайнов	Статистические значения параметров безотказности		Статистические значения параметров восстановления	
	закон распределения	дисперсия, $ч^2$	закон распределения	дисперсия, $ч^2$
Гидропривод подъема-опускания стола питателя	экспоненциальный, $P(t)=\exp(-986\cdot10^{-6}\cdot t)$	$1{,}03\cdot10^{6}$	экспоненциальный, $P(t)=\exp(-0{,}303\cdot t)$	10,9
Гидроагрегат КСП-33.09.01.000 В, система управления, трубопроводы	экспоненциальный, $P(t)=\exp(-117\cdot10^{-5}\cdot t)$	$0{,}73\cdot10^{6}$	экспоненциальный, $P(t)=\exp(-0{,}222\cdot t)$	20,25
Подсистемы поворота, подъема и телескопа исполнительного органа	экспоненциальный, $P(t)=\exp(-2{,}17\cdot10^{-3}\cdot t)$	$0{,}21\cdot10^{6}$	экспоненциальный, $P(t)=\exp(-0{,}192\cdot t)$	27
Гидроприводы хода правые и левые	экспоненциальный, $P(t)=\exp(-643\cdot10^{-6}\cdot t)$	$2{,}43\cdot10^{6}$	экспоненциальный, $P(t)=\exp(-0{,}143\cdot t)$	49

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

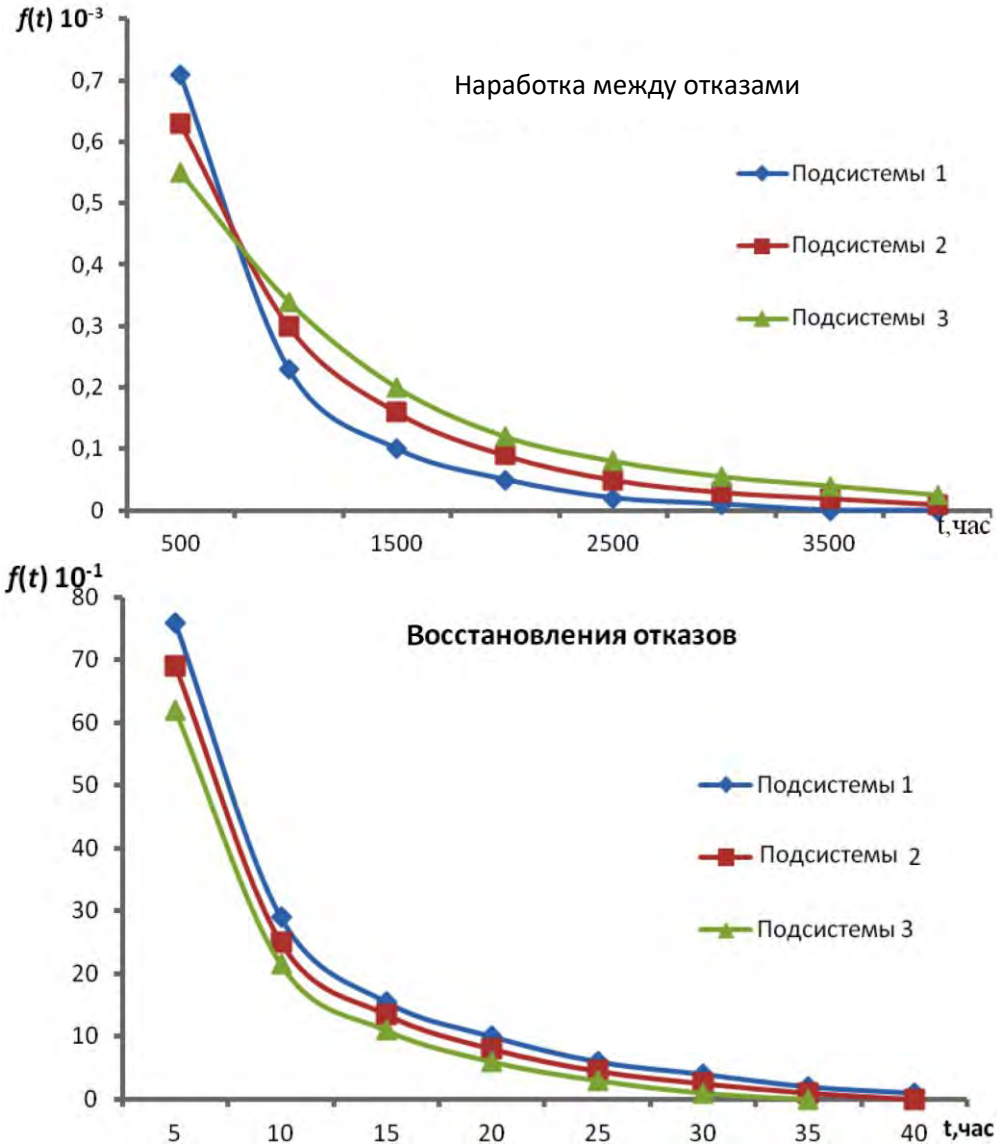


Рис. 2. Зависимости плотности вероятностей времени наработок между отказами и времени восстановления подсистем:
1 – поворота, подъема и телескопа исполнительных органов; *2* – гидроагрегатов КСП-33.09.01.000В;
3 – подъема-опускания столов питателей проходческих комбайнов типа КСП-32

Проведенный анализ выхода элементов гидравлических подсистем свидетельствует, что чаще всего при внезапных отказах теряют работоспособность уплотняющие манжеты и резиновые кольца (которые не обеспечивают герметичность), чистильщики, элементы силовых гидроблоков, управляющих гидравлических распределителей и др.

На основе анализа статистической информации о надежности элементов гидравлических подсистем и составных узлов разработаны рекомендации по конструктивному изменению элементов гидроприводов проходческих комбайнов. Эти изменения связаны в основном с устранением наиболее частых отказов вышеперечисленных узлов, которые приводили к значительным простоям комбайнов.

Выводы

Для возможности разработки рекомендаций по совершенствованию конструкций и для выбора рациональных параметров комбайнов проведены исследования по оценке данных о фактической эксплуатационной надежности машин в реальных шахтных условиях.

При проведении наблюдений за работой девяти комбайнов КСП-32 на восьми шахтах при суммарной проходке более 13,5 км горных выработок в различных горно-геологических условиях зафиксированы различные виды неисправностей: исполнительных органов и их приводов, питателей, конвейеров, ходовых частей, гидроагрегатов, магистральных трубопроводов, систем управления, а также подсистем подъема, поворота и телескопа исполнительных органов.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Установлено, что число отказов гидравлических подсистем составляет 78 % от всех отказов, зафиксированных при работе девяти проходческих комбайнов. Число отказов механических систем при этом составляет 22 %. Это свидетельствует о том, что надежность гидравлической системы комбайна значительно ниже, чем надежность механической системы. Причем средняя наработка до отказов механических систем комбайнов более значительная, чем средняя наработка до отказа гидравлических систем.

Исследования позволили выявить, что преобладающим законом плотности распределения времени наработки до отказов гидравлических подсистем (групп подсистем) проходческих комбайнов КСП-32 является экспоненциальный закон. Этому закону подчиняется распределение времени восстановления гидравлических подсистем (групп подсистем).

Экспоненциальный закон распределения наработки до отказа свидетельствует о преобладании внезапных отказов над износовыми отказами. Проведенный анализ выхода элементов гидравлических подсистем свидетельствует, что чаще всего при внезапных отказах теряют работоспособность уплотняющие манжеты и резиновые кольца (из-за снижения пластичности и герметичности), чистильщики, гидрозамки, обратные клапаны, элементы силовых гидроблоков и управляющих электрогидравлических распределителей.

Список литературы

1. Афендиков, Н.Г. Повышение надежности проходческих комбайнов избирательного действия со стреловидными исполнительными органами / Н.Г. Афендиков, А.В. Шендрик, К.Б. Ломаковский // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2018. – № 4(14). – С. 16-23.
2. Система государственного управления качеством продукции: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://mash-xxl.info/info/638346/
3. Вопросы математической теории надежности / Под ред. Б.В. Гнеденко. – М.: Радио и связь. – 1983. – 376 с.
4. ГОСТ 27.004-2015. Надежность в технике. Термины и определения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://standartgost.ru/g/ГОСТ 27.002-2015
5. Носенко, И.А. Повышение надежности горнопроходческих комбайнов применением оперативной диагностики привода исполнительного органа: автореф. дис…. канд. техн. наук: 05.05.06 / Носенко Иван Алексеевич. – Новочеркасск, 2008. – 23 с.
6. Ковалев, В.А. Эксплуатация проходческих комбайнов на шахтах ОАО «СУЭК-Кузбасс» / В.А. Ковалев и др. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2013. – С. 26-33.
7. Носенко, С.И. Методика организации сбора и анализа информации об эксплуатационных качествах проходческого оборудования в условиях Российского Донбасса / С.И. Носенко, Е.А. Шемшура. – Шахты, 1996. – 40 с.
8. Лапач, С.Н. Планирование в пассивном эксперименте // Математические машины и системы. – 2013. – №4. – С. 156-160.
9. Славутский, Л.А. Основы регистрации данных и планирования эксперимента. – Чебоксары: ЧГУ, 2006. – 200 с.
10. Аронов, И.З. Оценка надежности по результатам сокращенных испытаний / И.З. Аронов, Е.И. Бурдасов. – М.: Изд. стандартов, 1987. – 184 с.
11. Лемешко, Б.Ю. К оцениванию параметров надежности по цензурированным выборкам / Б.Ю. Лемешко, С.Я. Гильдебрант, С.Н. Постовалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2001. – №1. Т.67. – С. 52-64.
12. Diciccio, T.J. Bootstrap Confidence Intervals / T.J. Diciccio, B. Efron // Statistical Science. – 1996. – Vol.11. No.3. – P. 189-228.

N.G. Afendikov /Cand. Sci. (Eng.)/, A.V. Shendrik
Donetsk National Technical University (Donetsk)

STATISTICAL ESTIMATION OF RELIABILITY INDICES OF HYDRAULIC ACTUATORS OF SELECTIVE ACTION ROADHEADERS

Background. *The high reliability of selective action roadheaders provided at many stages – in conducting scientific-research and design works, the factory production and operation. In order to develop recommendations to improve reliability at these stages, it is necessary to know the statistical actual reliability indicators.*

Materials and/or methods. *The authors planned and carried out a passive experiment in the operation of nine of roadheaders in eight mines. The input controlled but uncontrollable factors during these*

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

experiments were the following parameters: type, strength, and abrasiveness of rocks, cross-section, and length of excavations. The output factors were the values of the operating time before the failures, the values of the recovery time and the number of failures.

Results. *Determined that the number of failures of hydraulic subsystems is 78 % of all failures recorded during the operation of roadheaders. The number of failures of mechanical systems is 22 %. This result indicates that the reliability of the hydraulic system of the header is much lower than the reliability of the mechanical system. Moreover, the average time before failure of mechanical systems is more significant than the average time to failure of hydraulic systems. Studies revealed that the governing law of the density distribution of operating time to failure of hydraulic subsystems (groups of subsystems) of KSP-32 headers is an exponential law. The same law applied to the distribution of recovery times of hydraulic subsystems (groups of subsystems).*

Conclusion. *The obtained values of reliability parameters of hydraulic system elements allowed developing recommendations for improving the elements of hydraulic drives of selective action roadheaders.*

Keywords: *selective action roadheader, reliability, operation time to failure, recovery time.*

Сведения об авторах

Н.Г. Афендиков
ORCID iD: 0000-0001-8876-7254
Телефон: +380 (71) 376-13-46
Эл. почта: an77tn@gmail.com

А.В. Шендрик
Телефон: +380 (71) 311-09-88
Эл. почта: gormash@i.ua

Статья поступила 13.03.2019 г.
© Н.Г. Афендиков, А.В. Шендрик, 2019
Рецензент д.т.н., проф. А.П. Кононенко



УДК 621.695

А.П. Кононенко /д.т.н./, Р.И. Божко
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

РАЦИОНАЛЬНАЯ ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ ЭРЛИФТНЫХ УСТАНОВОК С ВОЗДУХОСТРУЙНЫМИ КОМПРЕССОРАМИ

Установлена рациональная область применения нагнетательных эрлифтных установок с воздухоструйными компрессорами в качестве источников пневмоэнергии. Приведено аналитическое обоснование практически равноценной энергоэффективности работы (отличия не превышают ±5…10 %) нагнетательных эрлифтов с воздухоструйными компрессорами в сравнении с традиционными эрлифтами при возможности расширения области рационального применения нагнетательных эрлифтных установок.

Ключевые слова: *нагнетательный эрлифт, воздухоструйный компрессор, удельный расход воздуха, коэффициент инжекции, высота подъема, энергоэффективность, область применения.*

Постановка проблемы

Доказана возможность напорного транспортирования жидкости (гидросмеси) от воздухоотделителя к потребителю нагнетательными эрлифтными установками с радиальными нагнетателями [1]. Однако параметры сжатого воздуха (давление, расход), производимого серийно выпускаемыми радиальными нагнетателями, зачастую не соответствуют требуемым для заданной эрлифтной установки, а сами нагнетатели являются достаточно конструктивно сложными и относительно дорогостоящими. Это приводит к ощутимому увеличению приведенных расходов на единицу объема транспортируемой жидкости (гидросмеси), и применение радиальных нагнетателей в качестве источников пневмоэнергии для газожидкостных подъемников в этих условиях становится нецелесообразным. Особенно такая нецелесообразность проявляется при периодическом режиме работы эрлифтной установки, например, при чистках подземных технологических емкостей (зумпфов скиповых стволов, приемных колодцев водоотливных насосов и др.) угольных предприятий, осуществляемых, как правило, несколько раз в месяц.

При наличии на предприятии (шахте, заводе и т.п.) пневмосети общего назначения в ряде случаев целесообразно в качестве источника пневмоэнергии нагнетательного эрлифта применение воздухоструйного компрессора, преобразовывающего излишне высокое для этих условий давление воздуха в пневмосети в расход инжектируемой среды. Это позволяет уменьшить потребный расход рабочего агента (воздуха из пневмосети) в струйном аппарате и повысить энергетическую эффективность работы установки.

К тому же, воздухоструйные компрессоры проектируются и изготавливаются под конкретные условия применения, с заданными потребными давлением и расходом сжатого воздуха, что также минимизирует приведенные расходы на транспортирование жидкости (гидросмеси). Струйные аппараты конструктивно не являются сложными в изготовлении, не содержат, как и эрлифты, подвижных элементов в проточной части, что приоритетно в случае периодической эксплуатации данных установок.

Поэтому установление рациональной области применения нагнетательных эрлифтных установок с воздухоструйными компрессорами на основе обоснования целесообразных параметров их рабочего процесса является актуальной научной задачей, имеющей существенное практическое приложение.

Анализ последних исследований и публикаций

Обоснованные области применения, особенности рабочих процессов и конструктивного исполнения эрлифтных установок традиционной технологической схемы наиболее полно изложены в [2,3].

Расширение области применения за счет напорного транспортирования жидкости (гидросмеси) от воздухоотделителя к потребителю обеспечивают нагнетательные эрлифты. Доказана возможность, технико-экономическая целесообразность работы и приемлемые области использования таких эрлифтов при их пневмоснабжении от серийно производимых радиальных нагнетателей [1,4,5].

При наличии на предприятии пневматиче-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

ской сети в ряде случаев целесообразно применение в качестве источников пневмоэнергии для эрлифтов воздухоструйных компрессоров [6]. Однако вопросы воздухоснабжения струйными аппаратами нагнетательных эрлифтов не исследовались и не публиковались.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящего исследования является обоснование рациональной области применения нагнетательных эрлифтных установок с воздухоструйными компрессорами, запитанными от пневмосетей внутренних нужд предприятий, на основе установления особенностей рабочего процесса и энергоэффективности их работы.

Основной материал исследования

Принципиальная схема (рис. 1), последовательность запуска и работа нагнетательной эрлифтной установки с воздухоструйным компрессором преимущественно аналогичны принципиальной схеме, последовательности запуска и работе нагнетательной эрлифтной установки с радиальным нагнетателем [1].

Отличием рассматриваемой нагнетательной эрлифтной установки является включение в ее состав воздухоструйного компрессора 12 с трубопроводом рабочего воздушного потока 10, подсоединенного к пневмосети предприятия взамен радиального нагнетателя с влагоотделителем [1].

Запуск нагнетательной эрлифтной установки начинается с вывода на рабочий режим струйного компрессора 12 подачей рабочего воздуха через запорно-регулирующую задвижку 11 при открытых клапане 8 и задвижке 15. Дальнейшая последовательность операций по запуску нагнетательной установки со струйным компрессором аналогична последовательности операций, производимых при запуске нагнетательной установки с радиальным нагнетателем [1,4,5] с той разницей, что в процессе штатной работы установки обеспечивается отвод в окружающую среду в единицу времени через патрубок 7 количества воздуха, равного расходу рабочего воздуха из пневмосети через трубопровод 10.

Анализ особенностей рабочего процесса и энергоэффективности работы нагнетательной эрлифтной установки с воздухоструйным компрессором требует представления принципиальной схемы нагнетательного эрлифта (рис. 2б) в виде принципиальной эквивалентной схемы нагнетательного эрлифта с традиционным способом работы (рис. 2в). Эквивалентность (по условиям работы) эрлифтов схем (рис. 2б, 2в) обеспечивается одинаковыми геометрическими погружениями смесителей $h_н$ и одинаковыми давлениями $p_{вз}$ в подъемных трубах на высоте H от уровня свободной поверхности перекачиваемой жидкости в зумпфе.

Эквивалентный традиционный эрлифт (рис. 2г) обеспечивает ту же высоту подъема $H_н$, что и нагнетательный (рис. 2б), и служит для сравнения параметров рабочего процесса и энергоэффективности работы этой установки (рис. 2г) и эквивалентной нагнетательной установки (рис. 2в). Эрлифт традиционной технологической схемы (рис. 2а) при этом является базой для выполнения выше перечисленных анализов.

В общем случае при заданных высоте подъема эрлифта H и относительном погружении смесителя α [2] геометрическое погружение смесителя определяется зависимостью:

$$h = H\frac{\alpha}{1-\alpha}, \qquad (1)$$

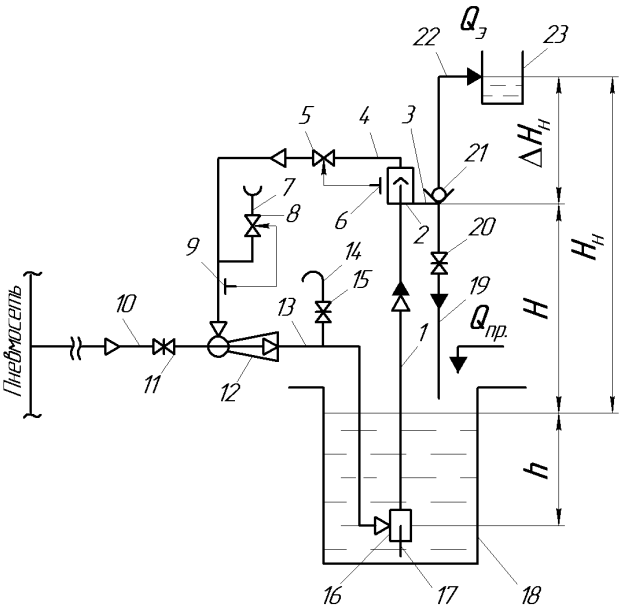
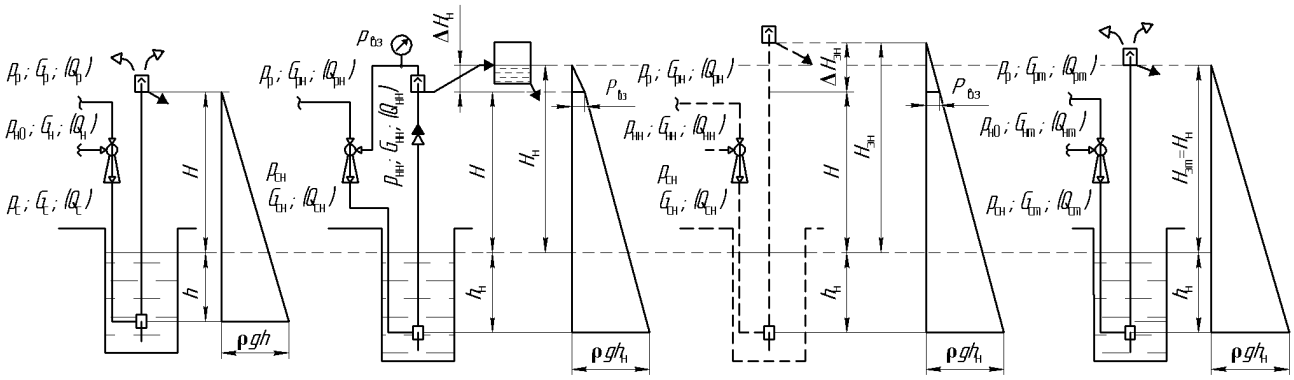


Рис. 1. Принципиальная схема нагнетательной эрлифтной установки с воздухоструйным компрессором:
1 − подъемная труба; *2* − воздухоотделитель; *3* − сливная труба; *4* − воздухоотводящая труба; *5, 8* − регулирующие клапаны; *6* − датчик уровня; *7* − патрубок; *9* − датчик давления; *10* – трубопровод рабочего воздушного потока; *11* – задвижка запорно-регулирующая; *12* – компрессор воздухоструйный; *13* − напорный воздухопровод; *14* − пусковой патрубок; *15, 20* − задвижка; *16* − смеситель; *17* − подающая труба; *18* − зумпф; *19* − сбросной трубопровод; *21* − обратный клапан; *22* – отводящий трубопровод; *23* − потребитель перекачиваемой жидкости

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org



а б в г

Рис. 2. Эпюры давления в подъемных трубах эрлифтов со струйным аппаратом:
а – традиционной технологической схемы; *б* − нагнетательного эрлифта;
в – эквивалентного нагнетательного эрлифта; *г* – эквивалентного традиционного эрлифта

а абсолютное давление в смесителе – выражением:

$$p_{см} = p_0 + \rho g h, \quad (2)$$

где p_0 – абсолютное давление окружающей среды (атмосферное давление); ρ – плотность перекачиваемой жидкости; g – ускорение свободного падения.

Удельный (при нормальных технических условиях на 1 м^3 транспортируемой жидкости – воды) расход воздуха для эрлифтов:

– при $(H+h)/D<200$, $\rho g h/p_0<2$, $4\le h\le 10$ м (D – эквивалентный диаметр подъемной трубы) [2]:

$$q = 0{,}767\alpha^{-2{,}2}; \quad (3)$$

– при $\alpha>0{,}5$ м [7]:

$$q = \frac{q_c}{\frac{p_0}{\rho g h}\ln(1+\frac{\rho g h}{p_0})}, \quad (4)$$

где q_c – среднее газосодержание в подъемной трубе

$$q_c = (22{,}7 + 10{,}1\alpha)0{,}0063^{0{,}97\alpha}. \quad (5)$$

Достижимый коэффициент инжекции газоструйного компрессора u и обеспечивающие его максимально возможное значение основные относительные геометрические характеристики аппарата f_{p1}/f_{p*} и f_3/f_{p*} (f_{p*}, f_{p1} – площади соответственно критического и выходного сечений рабочего сопла Лаваля, f_3 – площадь сечения камеры смешения цилиндрической формы) однозначно определяются давлениями потоков (абсолютными): p_p – рабочего, $p_н$ – инжектируемого, p_c – сжатого [8,9].

Исходя из соотношений [2,8,10,11,12]

$$q = \frac{Q_c}{Q_э}, G_c = G_p + G_н, u = \frac{G_н}{G_p}, G_c = \rho_{в0} Q_c, \quad (6)$$

где Q_c – объемный расход воздуха на выходе из воздухоструйного компрессора (на входе в смеситель эрлифта) при нормальных технических условиях; $Q_э$ – объемная подача эрлифта; G_c, G_p, $G_н$ – массовые расходы соответственно сжатого, рабочего и инжектируемого потоков воздуха в струйном компрессоре; $\rho_{в0}$ – плотность воздуха при нормальных технических условиях.

После элементарных преобразований можно получить зависимость для определения удельного (при нормальных технических условиях на 1 м^3 транспортируемой жидкости – воды) расхода рабочего (из пневмосети) воздуха:

$$q_p = \frac{Q_p}{Q_э} = \frac{q}{1+u}, \quad (7)$$

где Q_p – объемный расход рабочего воздуха (из пневмосети) при нормальных технических условиях, $Q_p = G_p/\rho_{в0}$.

Для эрлифтной установки с эрлифтом традиционной технологической схемы и струйным аппаратом (см. рис. 2а) с использованием выражений (1)…(5), (7), теоретических положений, высказанных в [13…15], с применением компьютерной программы для вычисления коэффициента инжекции газоструйного компрессора u [9] в диапазонах значений H=3…10 м, α=0,20…0,50, p_p=0,4…0,8 МПа и принятых соотношений $p_н = p_{н0} = p_0$, $p_c = p_{см}$ определены зависимости: $q_p/q = f(\alpha)$, $q_p/q = f(H)$, $q_p/q = f(p_p)$ (рис. 3).

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

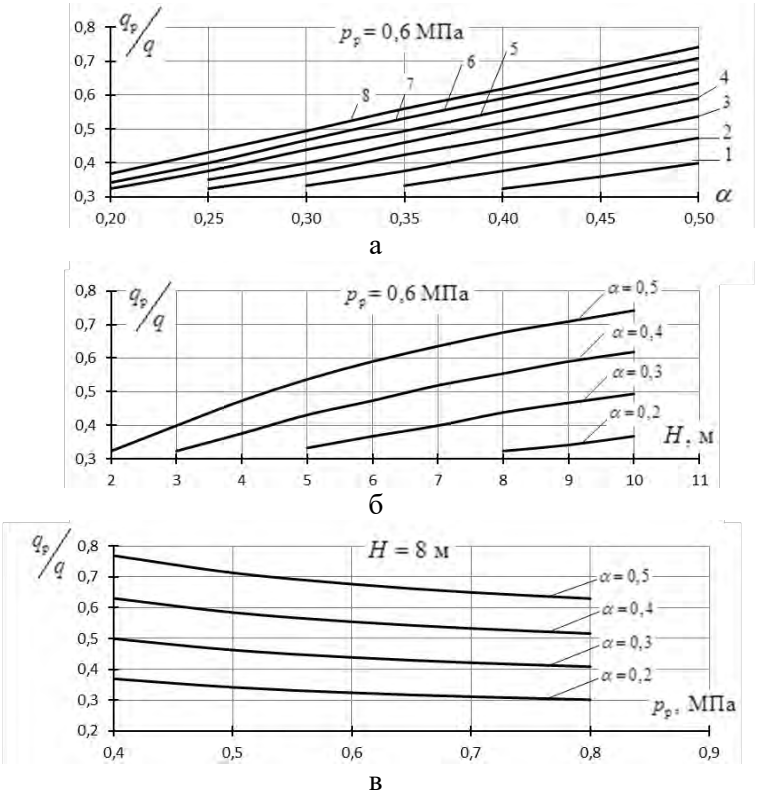


Рис. 3. Зависимости относительного удельного расхода рабочего воздуха q_p/q:
а – от относительного погружения смесителя α при *H*:
1 – 3 м; *2* – 4 м; *3* – 5 м; *4* – 6 м; *5* – 7 м; *6* – 8 м; *7* – 9 м; *8* –10 м;
б – от высоты подъема эрлифта *H*; *в* – от давления рабочего воздуха p_p

Как пример, при p_p=0,6 МПа в диапазоне *H*=3…10 м уменьшение относительного погружения смесителя от α=0,5 до α=0,2 обеспечивает уменьшение относительного удельного расхода рабочего воздуха q_p/q от ~0,40…0,75 до ~0,32…0,38 за счет более интенсивного увеличения коэффициента инжекции струйного аппарата *u* в сравнении с ростом удельного расхода воздуха *q* при имеющем место уменьшении геометрического погружения смесителя *h* (и, соответственно, уменьшении потребного давления сжатия струйного аппарата p_c) (см. рис. 3а).

Но, в то же время, абсолютное значение удельного расхода рабочего воздуха q_p, как и удельного расхода воздуха эрлифтом *q*, уменьшается с увеличением относительного погружения смесителя α (рис. 4).

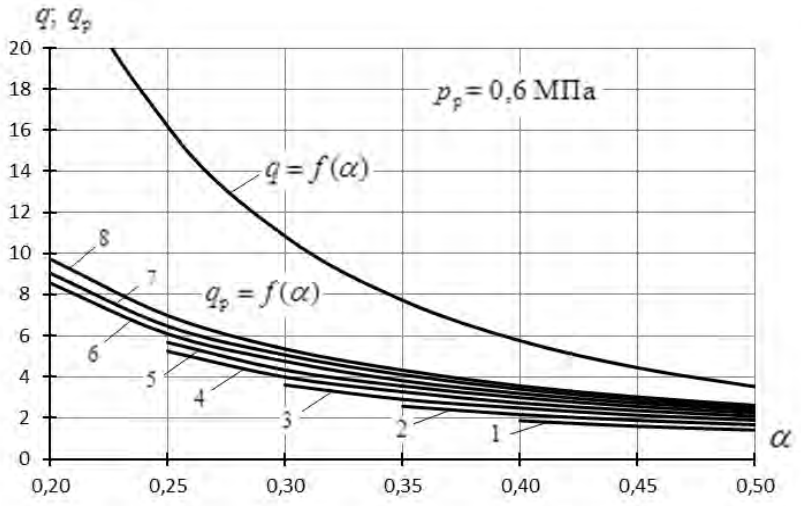


Рис. 4. Зависимости удельных расходов рабочего воздуха q_p и удельного расхода воздуха эрлифтом *q* от относительного погружения смесителя α при *H*:
1 – 3 м; *2* – 4 м; *3* – 5 м; *4* – 6 м; *5* – 7 м; *6* – 8 м; *7* – 9 м; *8* – 10 м

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Очевидно, в рассматриваемых условиях увеличение высоты подъема H от 2 до 10 м приводит к увеличению относительного удельного расхода рабочего воздуха q_p/q от 0,31 до 0,75 при α=0,2…0,5 (см. рис. 3б).

Увеличение давления рабочего воздуха p_p от 0,4 до 0,8 МПа обеспечивает снижение относительного удельного расхода рабочего воздуха q_p/q от 0,38…0,78 до 0,30…0,62 при принятой в качестве примера высоте подъема эрлифта H=8 м (см. рис. 3в).

Таким образом, использование воздухоструйного компрессора для преобразования излишне высокого давления рабочего воздуха в диапазонах p_p=0,4…0,8 МПа, H=3…10 м, α=0,20…0,50 обеспечивает снижение расхода воздуха из пневмосети до 2-х раз для эрлифтной установки с эрлифтом традиционной технологической схемы.

Для нагнетательного эрлифта избыточное давление в воздухоотделителе составляет (см. рис. 2б):

$$p_{вз} = \rho g \Delta H_н, \qquad (8)$$

где $\Delta H_н$ – высота переподъема нагнетательного эрлифта.

Высота переподъема $\Delta H_{эн}$ эквивалентного нагнетательного эрлифта определяется из соотношения (см. рис. 2в):

$$\frac{p_{вз}}{\rho g h_н} = \frac{\Delta H_{эн}}{H + h_н + \Delta H_{эн}}, \qquad (9)$$

откуда, с учетом (8):

$$\Delta H_{эн} = \frac{\Delta H_н (H_н - \Delta H_н + h_н)}{h_н - \Delta H_н}. \qquad (10)$$

Относительные погружения смесителей:

– эквивалентного нагнетательного эрлифта (см. рис. 2в)

$$\alpha_{эн} = \frac{h_н}{H_н - \Delta H_н + \Delta H_{эн} + h_н}, \qquad (11)$$

– эквивалентного традиционного эрлифта (см. рис. 2г)

$$\alpha_{эт} = \frac{h_н}{H_{эт} + h_н} = \frac{h_н}{H_н + h_н}. \qquad (12)$$

Пренебрегая потерями давления сжатого воздуха между выходным сечением струйного аппарата и входным сечением смесителя эрлифта принимаем равными значения абсолютных давлений

$$p_{сн} = p_{смн} = p_0 + \rho g h_н, \qquad (13)$$

где $p_{сн}$ – абсолютное давление сжатого воздуха на выходе из воздухоструйного компрессора нагнетательной эрлифтной установки; $p_{смн}$ – абсолютное давление в смесителе нагнетательного эрлифта.

Удельный расход воздуха $q_{эн}$ эквивалентного нагнетательного эрлифта (см. рис. 2в) определяется по зависимостям (3)…(5) при α=$\alpha_{эн}$, а удельный расход воздуха $q_{эт}$ эквивалентного традиционного эрлифта (см. рис. 2г) − по зависимостям (3)…(5) при α=$\alpha_{эт}$.

Абсолютное давление инжектируемого потока струйного аппарата нагнетательной (см. рис. 2б) и эквивалентной нагнетательной (см. рис. 2в) эрлифтной установки

$$p_{нн} = p_0 + \rho g \Delta H_н. \qquad (14)$$

Коэффициент инжекции $u_н$ воздухоструйного компрессора нагнетательной (см. рис. 2б) $u_н$ и эквивалентной нагнетательной (см. рис. 2в) $u_{эн}$=$u_н$ эрлифтной установки определяется для значений p_p, $p_{нн}$ и $p_{сн}$, а коэффициент инжекции воздухоструйного компрессора эквивалентной традиционной $u_{эт}$ эрлифтной установки (см. рис. 2г) для значений p_p, $p_{н0}$ и $p_{сн}$.

Удельный расход рабочего воздуха (из пневмосети) по аналогии с (7) определяется зависимостями:

− для эквивалентной нагнетательной (см. рис. 2в) эрлифтной установки

$$q_{рэн} = \frac{q_{эн}}{1 + u_{эн}}, \qquad (15)$$

− для эквивалентной традиционной (см. рис. 2г) эрлифтной установки

$$q_{рэт} = \frac{q_{эт}}{1 + u_{эт}}. \qquad (16)$$

Сравнение энергетической эффективности работы нагнетательного эрлифта и эрлифта традиционной технологической схемы выполнено на основе анализа рабочих процессов эквивалентного нагнетательного эрлифта (см. рис. 2в) и эквивалентного традиционного эрлифта (см. рис. 2г) при одинаковых геометрических погружениях смесителей $h_н$=idem и одинаковых высо-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

тах подъема транспортируемой жидкости $H_н$, которые обеспечиваются длинами подъемных труб выше уровня свободной поверхности жидкости в зумпфах:

– для эквивалентного нагнетательного эрлифта

$$H_{эн} = H + \Delta H_{эн} = H_н - \Delta H_н + \Delta H_{эн}, \quad (17)$$

– для эквивалентного традиционного эрлифта

$$H_{эт} = H + \Delta H_н = H_н. \quad (18)$$

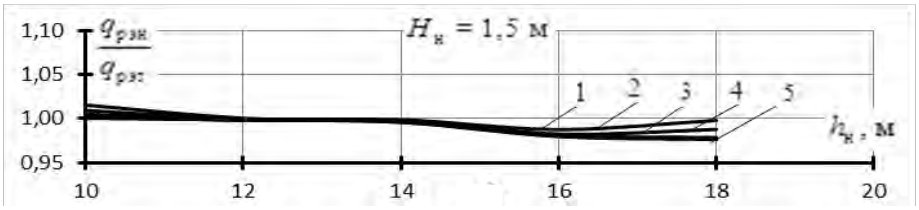
Для эквивалентного нагнетательного (см. рис. 2в) и эквивалентного традиционного (см. рис. 2г) эрлифтов с использованием выражений (3)…(5), (10)…(16) и компьютерной программы для вычисления коэффициента инжекции газоструйного компрессора u в диапазонах значений $p_р$=0,4…0,8 МПа, $H_н$=1…10 м, $h_н$= =10…18 м, $\Delta H_н$=0,5…2,5 м определены зависимости $q_{рэн}/q_{рэт}=f(h_н)$, $q_{рэн}/q_{рэт}=f(H_н)$, $q_{рэн}/q_{рэт}=f(\Delta H_н)$, $q_{рэн}/q_{рэт}=f(p_р)$ (рис. 5…7).

На рис. 5а и 5г $\Delta H_н$: *1* – 0,5 м; *2* – 1 м; *3* – 1,5 м; *4* – 2 м; *5* – 2,5 м.

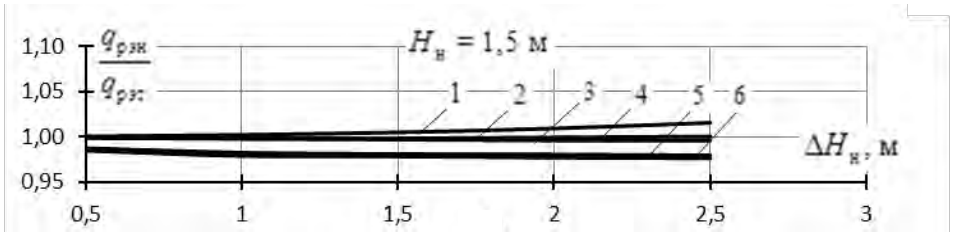
На рис. 5б $h_н$: *1* – 10 м; *2* – 12 м; *3* – 14 м; *4* – 15 м; *5* – 16 м; *6* – 18 м.

На рис. 5в $H_н$: *1* – 1 м; *2* – 2 м; *3* – 3 м; *4* – 4 м; *5* – 5 м; *6* – 6 м.

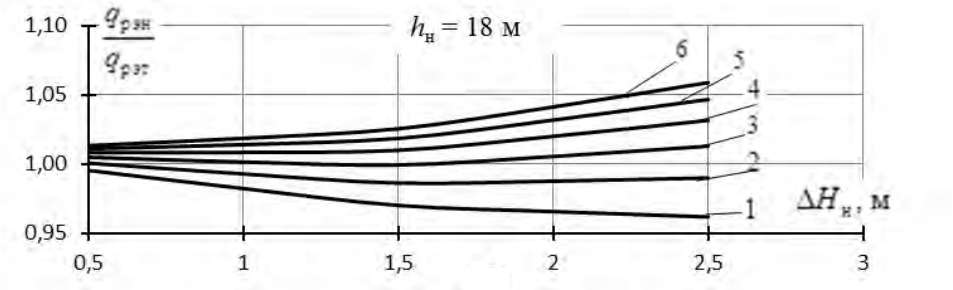
Как следует из полученных в результате расчетов и приведенных в качестве примеров зависимостей, в диапазонах указанных значений $p_р$, $H_н$, $h_н$, $\Delta H_н$ удельный расход рабочего воздуха нагнетательного эрлифта $q_{рэн}$ отличается от удельного расхода рабочего воздуха традиционного эрлифта $q_{рэт}$ не более чем на ±5…10 % при прочих равных условиях.



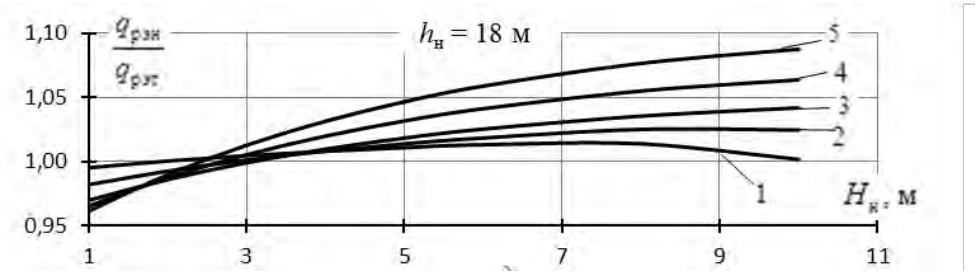
а



б



в



г

Рис. 5. Зависимости относительных удельных расходов рабочего воздуха $q_{рэн}/q_{рэт}$ нагнетательного эрлифта при $p_р$ = 0,6 МПа от:
а – геометрического погружения смесителя $h_н$; *б*, *в* – высоты переподъема $\Delta H_н$; *г* – высоты подъема $H_н$

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

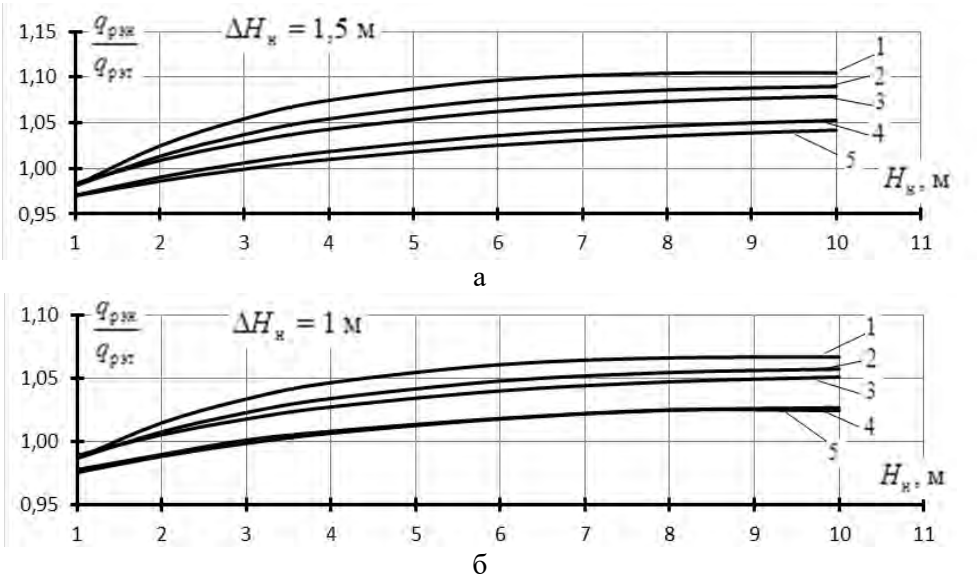


Рис. 6. Зависимости относительных удельных расходов рабочего воздуха $q_{рэн}/q_{рэт}$ нагнетательного эрлифта от высоты подъема $H_н$ при $p_р$=0,6 МПа, $h_н$: *1* – 10 м; *2* – 12 м; *3* – 14 м; *4* – 16 м; *5* – 18 м при высоте переподъема $\Delta H_н$ (*а* – 1,5 м, *б* – 1 м)

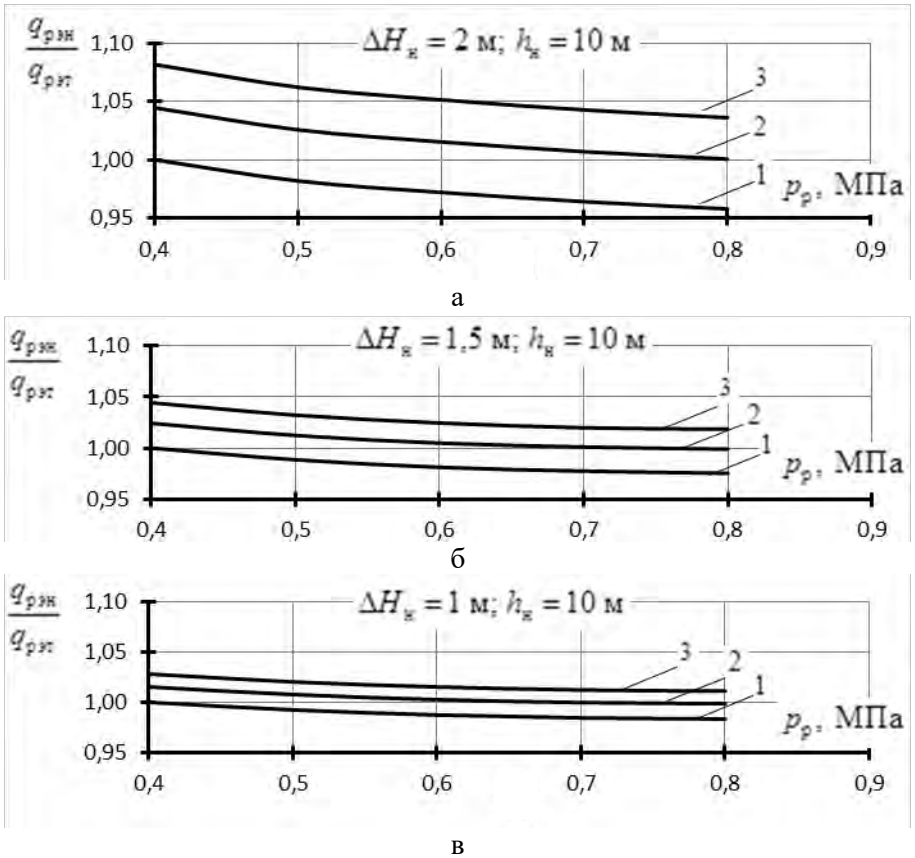


Рис. 7. Зависимости относительных удельных расходов рабочего воздуха $q_{рэн}/q_{рэт}$ нагнетательного эрлифта от абсолютного давления рабочего воздуха $p_р$ при $H_н$: *1* – 1 м; *2* – 1,5 м; *3* – 2 м; $h_н$ = 10 м и $\Delta H_н$ (*а* – 2 м, *б* – 1,5 м, *в* – 1 м)

Полученные результаты позволяют утверждать о практически равноценной энергоэффективности работы нагнетательного и традиционного эрлифтов с приведенными параметрами рабочих процессов при расширении области применения нагнетательных эрлифтных установок с воздухоструйными компрессорами за счет возможности напорного транспортирования

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

жидкости (гидросмеси) от воздухоотделителя к потребителю в отличие от только безнапорного транспортирования традиционными эрлифтными установками.

Выводы

Доказано, что применение воздухоструйного компрессора, запитанного от пневмосетей общего назначения (шахтных, заводских и т.п.), для пневмоснабжения эрлифтов традиционной технологической схемы в диапазонах значений давлений рабочего воздуха $p_р$=0,4…0,8 МПа, высот подъема эрлифта H=3…10 м, относительных погружений смесителей α=0,20…0,50 позволяет уменьшить до двух раз расход рабочего воздуха из пневмосети за счет преобразования излишне высокого давления рабочего агента в расход инжектируемого потока (атмосферного воздуха).

Для диапазонов значений давлений рабочего воздуха $p_р$=0,4…0,8 МПа, высот подъема жидкости (гидросмеси) $H_н$=1…10 м, геометрических погружений смесителей $h_н$=10…18 м, высот переподъема нагнетательного эрлифта $\Delta H_н$= =0,5…2,5 м энергоэффективность работы нагнетательных эрлифтных установок с воздухоструйными компрессорами практически не отличается (отличия не превышают ±5…10 %) от энергоэффективности работы эрлифтных установок традиционной технологической схемы с теми же значениями геометрических погружений смесителей и высот подъема жидкости (гидросмеси).

Однако возможность использования нагнетательных эрлифтных установок в стесненных (по вертикали) условиях и напорного транспортирования жидкости (гидросмеси) от воздухоотделителя эрлифта к потребителю значительно расширяет области их рационального применения.

Представленные в данной работе результаты являются основой дальнейших исследований по применению в составе нагнетательных эрлифтных установок воздухоструйных компрессоров более высокой энергетической эффективности, как, например, струйных аппаратов с пульсирующей подачей рабочего потока.

Список литературы

1. Божко, Р.И. Обоснование энергетической целесообразности применения нагнетательных эрлифтных установок с радиальными нагнетателями / А.П. Кононенко, Р.И. Божко // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2017. – №1(7). – С. 11-19.
2. Папаяни, Ф.А. Энциклопедия эрлифтов / Ф.А. Папаяни и др. – М.: Информсвязьиздат, 1995. – 592 с.
3. Кононенко, А.П. Рабочий процесс эрлифта и его моделирование. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2010. – 171 с.
4. Божко, Р.И. Области применения нагнетательных эрлифтных установок с радиальными нагнетателями / А.П. Кононенко, Р.И. Божко // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2018. – №1. Т.14. – С. 29-37.
5. Божко, Р.И. Особенности применения радиальных нагнетателей в составе нагнетательных эрлифтных установок / А.П. Кононенко, Р.И. Божко // Вестник Донецкого национального технического университета. − 2018. − №4(14). − С.24-33.
6. Малеев, В.Б. Специальные средства водоотлива и гидромеханизированной очистки шахтных водосборных емкостей: учебн. пособие / В.Б. Малеев, Е.И. Данилов, В.М. Яковлев. – Донецк: ДПИ, 1986. – 36 с.
7. Адамов, Б.И. Исследование и разработка глубоководных эрлифтных установок для подъема твердого материала: дис. … канд. техн. наук: 05.05.06 / Адамов Борис Исаевич. – Донецк, 1982. – 323 с.
8. Соколов, Е.Я. Струйные аппараты / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. – М.: Энергия, 1989. – 352 с.
9. Кононенко, А.П. Экспериментальное обоснование рациональной методики расчета газоструйного компрессора / А.П. Кононенко, В.А. Панов // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2018. – №3(13). – С. 25-33.
10. Кононенко, А.П. Повышение эффективности гидромеханической чистки подземных емкостей угольных шахт / А.П. Кононенко, В.В. Гокун // XVI Міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика», Суми, 14-16 жовтня 2015 р. – Вінниця: ГЛОБУС-ПРЕС, 2015. – С. 180-181.
11. Финкельштейн, З.Л. Средства гидромеханизации: учеб. пособ. / З.Л. Финкельштейн, Л.Н. Козыряцкий. – Алчевск: ДонГТУ, 2013. – 168 с.
12. Козыряцкий, Л.Н. Эрлифты и гидроэлеваторы в горной промышленности: учеб. пособ. / Л.Н. Козыряцкий и др. – Донецк: ГОУВПО «ДонНТУ», 2017. – 160 с.
13. Kyrychenko, Y. Advanced method for calculation of deep-water airlifts and the special software development / Y. Kyrychenko, V. Kyrychenko, A. Taturevych // Technical and Geoinformational Systems in Mining. – London: CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, 2011.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

– P. 215-222.
14. Kyrychenko, Y. Research of dynamic processes in deep-water pumping hydrohoists lifting two-phase fluid / Y. Kyrychenko, V. Kyrychenko, A. Romanyukov // Technical and Geoinformational Systems in Mining. – London: CRC Press/ Balkema, Taylor & Francis Group, 2011. – P. 115-124.
15. Mikami, T. Free vibration analysis of shells of revolution considering the fluid-structure interaction / T. Mikami, J. Yoshimura // Mem. Fac. Eng. Hokkaido Univ. – 1990. – № 1. – P. 1-15.

A.P. Kononenko /Dr. Sci. (Eng.)/, R.I. Bozhko
Donetsk National Technical University (Donetsk)

RATIONAL APPLICATION FIELD OF INJECTION AIR-LIFT UNITS WITH AIR-JET COMPRESSORS

Background. *The possibility of the pressure fluid (slurry) transport from the air-purge drum to the consumer by pressure air-lift installations with radial superchargers proved. However, the parameters of compressed air in this case often do not correspond to those required for a given air-lift installation. At the same time, in case of presence at the enterprise of the pneumatic network of general-purpose, it is often advisable to use an air-jet compressor as a source of pneumatic energy of the discharge air-lift, which converts excessively high air pressure into the flow rate of the injected medium. The above mentioned allows for increasing the energy efficiency of the plant. Determining a rational field of application of pressure air-lift units with air-jet compressors based on the justification of reasonable parameters of their working process is an urgent scientific problem with significant practical use.*

Materials and/or methods. *Using the developed analytical technique for analysing the parameters of the working process of the injection air-lift unit with an air jet compressor, based on a comparison of the energy efficiency of the equivalent discharge air-lift scheme and the equivalent scheme of the traditional air-lift, and studied the parameters of the injection air-lift units.*

Results. *Proved that the use of air-jet compressor powered by general-purpose pneumatic networks for the pneumatic supply of air-lifts of the traditional technological scheme in the ranges of pressures of the working air p_p=0.4...0.8 MPa, the heights of the air-lift H=3...10 m, the relative mixers dive α=0.20...0.50 allows reducing up to two times the flow rate of the working air from the pneumatic network by converting the excessively high pressure of the working agent into the flow rate of the injected flow.*

Conclusion. *For the ranges of pressure values of the working air p_p=0.4...0.8 MPa, rise of liquid (slurry) H=1...10 m, mixers geometric dives $h_н$=10...18 m, re-lift height of discharge air-lift $\Delta H_н$=0.5...2.5 m the energy efficiency of the injection air-lift units with air-jet compressors is practically identical (the differences do not exceed ±5...10 %) of the energy efficiency of air-lift units of traditional technological schemes with the same values of geometric mixers dives and height of liquid rise. However, the possibility of using injection air-lift units in cramped (vertical) conditions and pressure transportation of liquid from the air-lift air separator to the consumer significantly expands the scope of their rational application.*

Keywords: *pressure air-lift, air-jet compressor, specific air consumption, injection ratio, lift height, energy efficiency, application.*

Сведения об авторах

А.П. Кононенко
SPIN-код: 3828-6755
Телефон: +380 (71) 334-90-21
Эл. почта: ap.kononenko@mail.ru

Р.И. Божко
SPIN-код: 2510-2591
Телефон: +380 (71) 386-16-39
Эл. почта: bozhko342@mail.ru

Статья поступила 29.08.2019 г.
© А.П. Кононенко, Р.И. Божко, 2019
Рецензент д.т.н., проф. В.П. Кондрахин

УДК 622.2 (26.03)

В.Б. Малеев /д.т.н./, Н.И. Скорынин /к.т.н./, А.А. Кудрявцев
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗАПУСКОМ И ОСТАНОВОМ ЭРЛИФТНОГО ГИДРОПОДЪЕМА

Разработаны алгоритмы запуска и останова глубоководного эрлифта с учетом отклонения текущих значений расхода гидросмеси и концентрации твердого от заданных значений.

Ключевые слова: *гидросмесь, эрлифтный гидроподъем, сжатый воздух, смеситель.*

Постановка проблемы

Эрлифтный гидроподъем в технологическом процессе добычи полезных ископаемых со дна водоемов и очистки шахтных водоотливных емкостей от осевшего шлама и твердых частиц представляет собой сложный объект управления и контроля, характеризующийся следующими особенностями: широким спектром возмущений; распределенностью и удаленностью точек контроля и узлов управления от пульта управления; неконтролируемостью ряда факторов и большими запаздываниями в каналах измерения и управления.

При этом следует отметить, что управление эрлифтной установкой по подъему гидросмеси в основном определяется путем изменения подачи сжатого воздуха в смеситель, что в значительной мере определяет режимы запуска и останова эрлифта. Поэтому управление процессами запуска в работу эрлифтной установки и ее остановки является актуальным.

Анализ последних исследований и публикаций

В работах [1...3] показано, что критерием управления запуском эрлифта в работу является минимум времени запуска $\Delta t_3^{\min}$ при допустимых значениях контролируемых расходов воздуха в смеситель эрлифтной установки. Штатный останов производится путем уменьшения задания на расход воздуха, аварийный останов системы эрлифтного гидроподъема осуществляется путем открытия продувочного клапана и останова компрессорной станции.

При этом на основании выходной информации эрлифта не разработаны алгоритмы управления пуском и остановом гидравлического подъема, работающего совместно с компрессором [4…6].

Цель (задачи) исследования

Цель настоящей работы – на основании критериев управления запуском в работу и остановкой эрлифта получить соответствующие алгоритмы автоматизированного управления этими процессами.

Основной материал исследования

Входная информация подсистемы автоматизированного управления технологическим процессом эрлифтного гидроподъема железомарганцевых конкреций (ЖМК), необходимая для решения рассматриваемых задач, включает переменную и условно-постоянную информацию. Последняя содержит постоянные и настроечные параметры системы управления, а переменная – параметры, поступающие от датчиков.

Переменная входная информация рассматриваемого комплекса задач определяет: объемный расход воздуха в смеситель эрлифта $Q_в$ и его давление на входе в смеситель $P_{см}$; мощность, потребляемую компрессорной станцией, $N_к$; объемный расход гидросмеси в транспортном трубопроводе $Q_{гсТр}$; плотность гидросмеси в контрольных точках транспортного трубопровода $\rho_{гсТр}$; расход твердого на выходе дозатора $Q_{Тдз}$; задание на расход гидросмеси $Q_{гсз}$; задание концентрации $S_з$.

По используемой условно-постоянной информации оператор-технолог определяет значения соответствующих параметров: максимальная подача воздуха компрессорной станцией $Q_к^{\max}$; максимальный расход гидросмеси в транспортном трубопроводе $Q_{гсТр}^{\max}$; максимальная мощность привода компрессорной станции $N_к^{\max}$; допустимая разность давлений внешней среды и внутри воздухопровода ΔP; диаметр транспортного трубопровода $d_{Тр}$; плотность твердых частиц $\rho_Т$; плотность морской воды $\rho_в$; средневзвешенный размер частиц твердого $d_Т$; длина подводящей трубы эрлифта $l_{Тр}$; глубина погружения смесителя h; высота подъема гидросмеси над уровнем моря $H_п$; длина трубопровода L; допустимое отклонение мощности компрессорной станции от оптимального режима $\Delta N_д$; началь-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

ный шаг поиска оптимального режима по концентрации (1…1,5) %; шаг дискретизации задания объемного расхода гидросмеси по уровню 0…200 м^3/мин; шаг дискретизации задания объемного расхода воздуха по времени 0…10 с; максимальное время переходного процесса по расходу воздуха в смеситель $\Delta t_в^{\max}$=5…30 с; максимальное время переходного процесса по расходу гидросмеси в транспортном трубопроводе $\Delta t_{гс}^{\max}$=50…250 с; допустимое отклонение расхода гидросмеси от задания $\Delta Q_{гс}$.

Ввиду того, что предусмотрен контроль значений плотности гидросмеси в ряде точек транспортного (подъемного) трубопровода, а не концентрации, то при решении рассмотренных задач управления значения концентрации твердых полезных ископаемых в гидросмеси в этих точках:

$$S_i = \frac{\rho_i - \rho_в}{\rho_T - \rho_в}, \qquad (1)$$

где S_i, ρ_i – соответственно значения концентрации и плотности гидросмеси в i-й контрольной точке транспортного трубопровода.

Алгоритм управления запуском эрлифта приведен на рис. 1. Процесс запуска начинается вводом условно-постоянной информации (УПИ), включающей значения заданного и допустимого перепадов давления в смесителе, конструктивные параметры воздухопровода, физико-механические характеристики компонентов гидросмеси, геометрическое погружение смесителя и т.д. (символы 1, 2). В символах 3, 4 вводится значение заданной производительности системы подъема ЖМК, Q_{mT3}, и рассчитывается значение $Q_{гскр}$ критического расхода гидросмеси в подающем трубопроводе. При этом учитывается расчетное значение концентрации ЖМК, S, соответствующее значению Q_{mT3}:

$$S = \frac{Q_{mT3}}{Q_{гс} \cdot \rho_T}, \qquad (2)$$

где $Q_{гс}$ – расход гидросмеси.

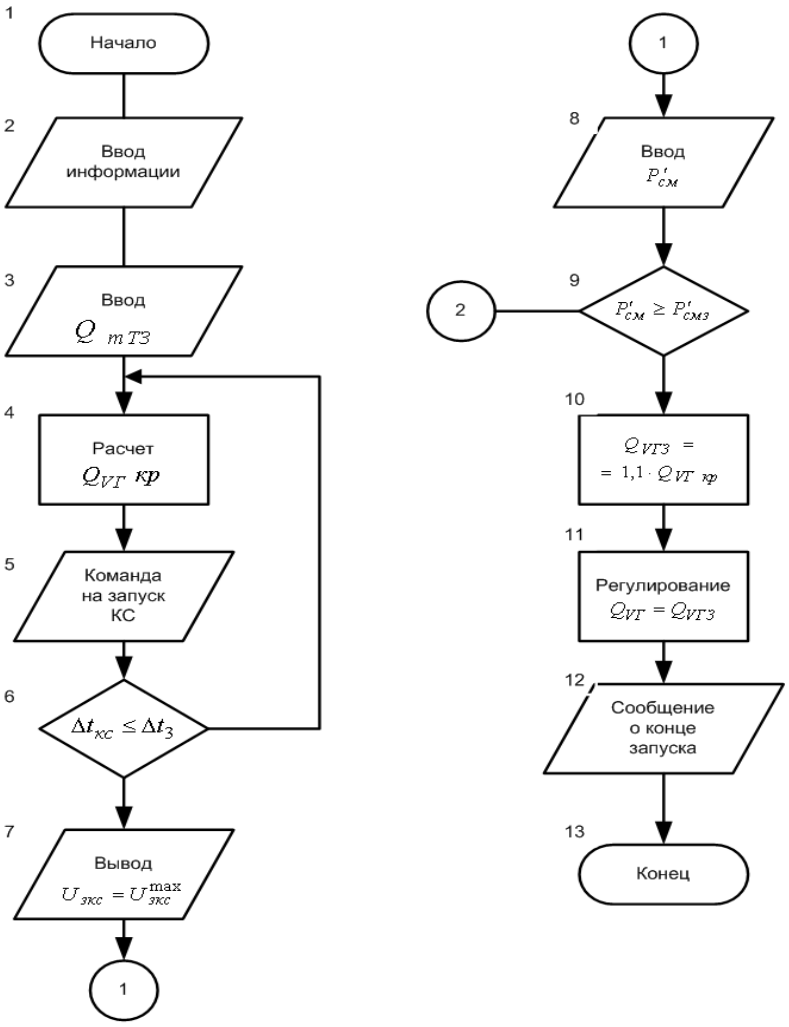


Рис. 1. Алгоритм автоматизированного управления запуском эрлифтного гидроподъема

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Далее, в течение времени $\Delta t_{гс\,з}$ (заданного в УПИ) происходит запуск компрессорной станции (символы 5, 6), а затем на привод компрессорной станции выводится максимально допустимое задание на расход сжатого воздуха $u_{ксз}^{\max}$ (символ 7). При этом контролируется значение перепада давления в смесителе по отношению к наружной воде $P'_{см}$ (символы 8, 9).

При условии $P'_{см} \geq P'_{см\,з}$ ($P'_{см\,з}$ – давление, соответствующее геометрическому погружению смесителя с учетом столба воды, вытесненного из воздухопровода в подъемный став, завершается вытеснение воды из воздухопровода и начинается «трогание» эрлифта, а на компрессорную станцию выдается задание на расход воздуха, соответствующего расчетному надкритическому расходу гидросмеси в подающем трубопроводе (символы 10, 11) $Q_{гс}$=1,15$Q_{гс\,кр}$. Запуск эрлифта на воде завершается, о чем сообщается оператору (символы 12, 13).

Алгоритм автоматизированного управления остановом эрлифтного гидроподъема приведен на рис. 2. Вначале производится ввод УПИ (символы 1, 2) и анализируется признак останова (символ 3). При штатном останове выводится команда на отключение привода дозатора (если он был включен) (символ 4) и производится регулирование расхода воздуха до достижения минимального надкритического расхода гидросмеси $Q_{гс}$=1,15$Q_{гс\,кр}$ (символ 5).

Этот расход поддерживается до тех пор, пока средняя плотность гидросмеси на входе транспортного трубопровода $\bar{\rho}_{гс\,ТТ\,вых}$ не будет равна плотности воды $\rho_в$ в течение заданного интервала времени $\Delta t_з$, соответствующего длительности освобождения трубопровода от твердого полезного ископаемого (анализ этих условий – в символах 6, 7).

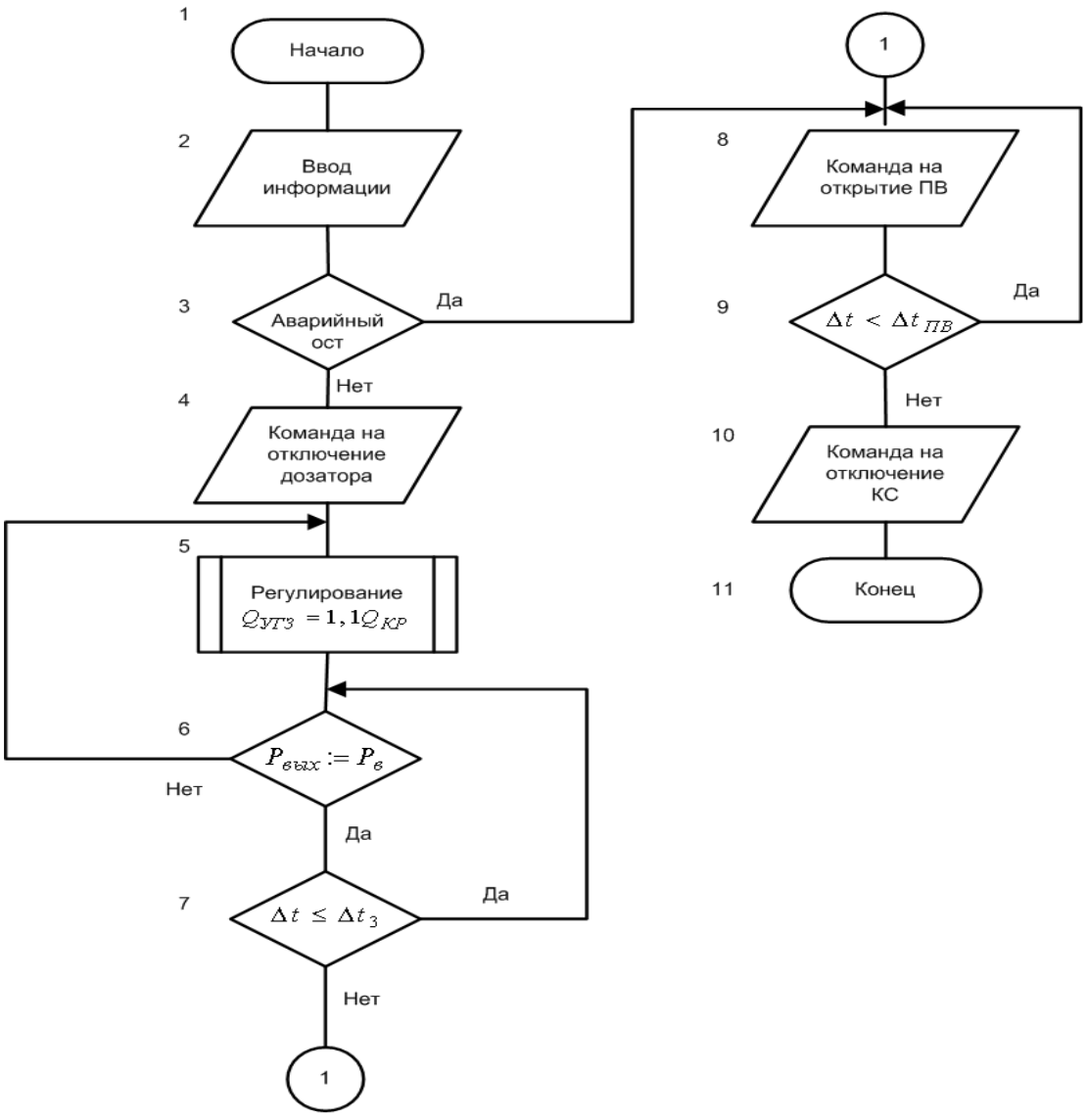


Рис. 2. Алгоритм автоматизированного управления остановом эрлифтного гидроподъема

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Затем в течение заданного времени $\Delta t_{ов}$ открывается продувочный вентиль (символы 8, 9) и выдается команда на отключение компрессорной станции (символы 10, 11).

При аварийном останове эрлифта после анализа в символе 3 выполняются символы (8…11).

Алгоритм автоматического регулирования расхода воздуха в смеситель представлен на рис. 3.

В символах 1, 2 производится ввод переменной информации и условно-постоянной информации. Затем в символе 3 определяется разность ΔP давлений внешней среды и внутри воздухопровода на входе в смеситель:

$$\Delta P = P_{ст} - P_{см}, \qquad (3)$$

где $P_{ст}$ – гидростатическое давление внешней среды в точке подвода воздуха в смеситель; $P_{ст}$ – давление в воздухопроводе на входе в смеситель.

Величина ΔP анализируется в символах 4, 5. Если разность давлений меньше допустимого давления $\Delta P_д$ на стенку воздухопровода, то производится переход на символ 12, иначе – на символ 5.

При $\Delta P > \Delta P_д$ в символе 7 производится сравнение заданного расхода воздуха $Q_{вс\,з}$ в смеситель с граничным $Q_{вп}$ и, если он больше, осуществляется переход на символ 8, иначе – на символ 13.

В символе 8 анализируется режим ограничения расхода воздуха по давлению на стенку воздухопровода ($K_р$=0 – ограничение отсутствует), заданию на расход воздуха $Q_{вс\,з}$ присваивается граничное значение $Q_{вп}$ (символ 9), устанавливается признак ограничения по расходу $K_р$=1 (символ 10) и выдается сообщение оператору об ограничении расхода воздуха давлением на стенку воздухопровода (символ 11). При выходе из ограничения восстанавливается прежнее задание $Q_{вс\,з}$ и сбрасывается ограничение $K_р$=0 (символ 12).

При равенстве $\Delta P = \Delta P_д$ запоминается расход воздуха на входе в смеситель, при котором в данных условиях обеспечивается допустимое давление на стенку воздухопровода $Q_{вп}$=0,9$Q_{вс}$ (символ 6).

Далее производится контроль мощности, потребляемой приводом компрессорной станции.

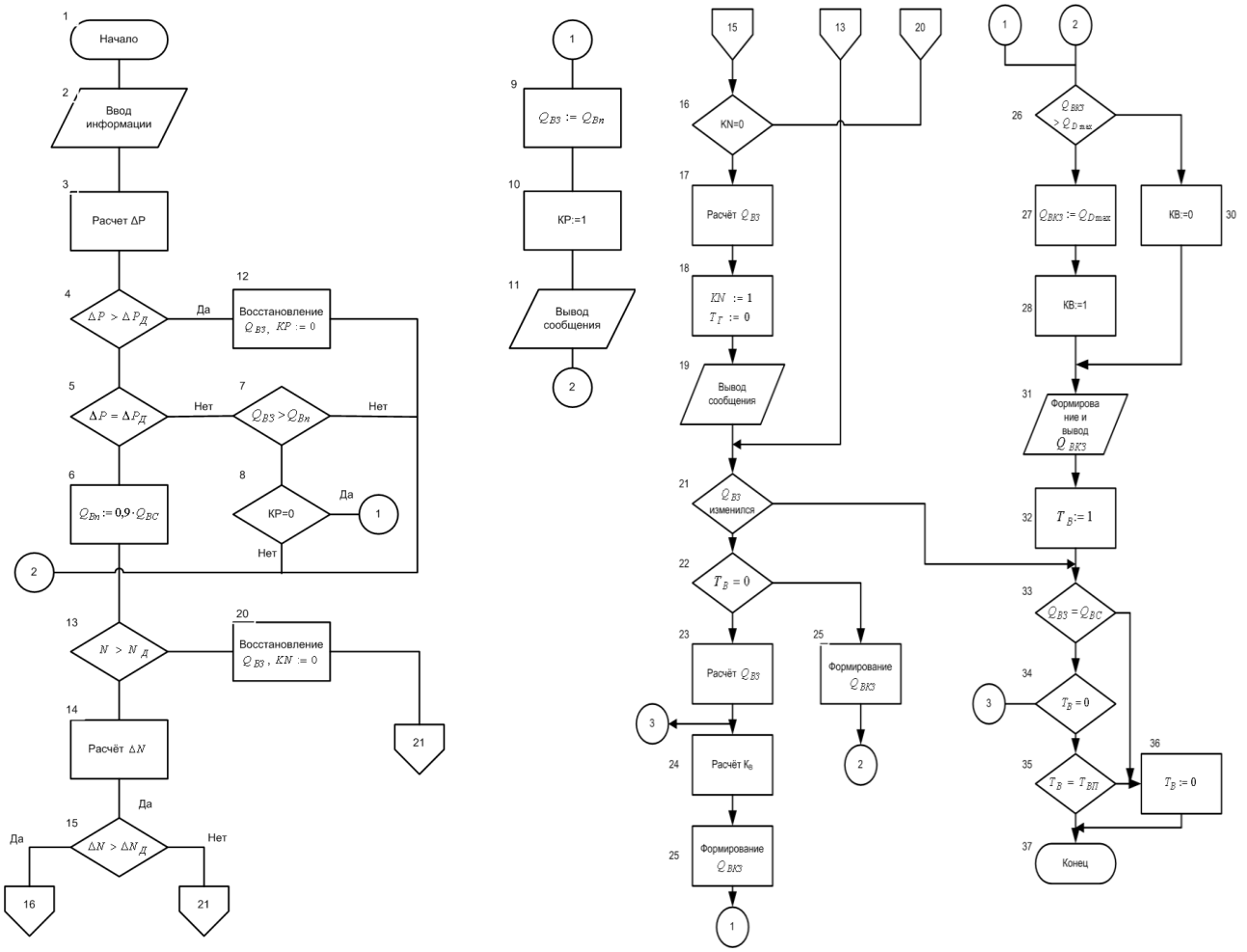


Рис. 3. Алгоритм регулирования расхода воздуха в смеситель эрлифтной установки

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Если текущее значение мощности, потребляемой приводом компрессорной станции, больше максимально допустимого: $N > N_д^{max}$, то определяется перегрузка $\Delta N = N - N_д^{max}$ привода компрессорной станции (символ 14), т.е. сбрасывается признак ограничения по мощности K_N=0 и восстанавливается прежнее задание (символ 20).

В символе 15 анализируется значение перегрузки привода компрессорной станции. Если перегрузка больше допустимой: $\Delta N > N_д$, то осуществляется переход на символ 16, иначе – на символ 21. Если на предыдущем цикле был установлен признак ограничения по мощности K_N=1 (анализ в символе 15), то осуществляется переход на символ 21, иначе – на символ 17.

Корректировка задания воздуха в смеситель осуществляется по расходу на предыдущем шаге $[Q_{вс\,з}]$ в соответствии с выражением $Q_{вс\,з}=[Q_{вс\,з}]\cdot N_д/N$. В символе 18 устанавливается признак ограничений по мощности K_N=1 и признак ($T_{гс}$=0) начала переходного процесса по расходу гидросмеси. В символе 19 формируется сообщение оператору о превышении допустимой мощности, потребляемой приводом компрессорной станции, а в символе 21 производится анализ задания на расход воздуха в смеситель. Если по сравнению с предыдущим циклом задание изменилось и переходный процесс по расходу воздуха закончится $T_в$=0 (символ 22), то производится расчет отключения расхода воздуха в смеситель от заданного $\Delta Q_{вс}=Q_{вс\,з}-Q_{вс}$ (символ 23). Если задание не изменилось, осуществляется переход на символ 33. В случае, если переходный процесс по предыдущему возмущению не закончен $T_в \neq 0$ (символ 22), осуществляется переход на символ 29.

В символе 24 производится расчет передаточного коэффициента в воздухопроводе как отношение расхода воздуха на выходе компрессорной станции (на входе воздухопровода эрлифтной установки) $Q_{вк}$ к расходу воздуха в смеситель $Q_{вс}$ ($K_в=Q_{вк}/Q_{вс}$). В символе 25 формируется задание на расход воздуха компрессорной станции:

$$Q_{вк\,з} = [Q_{вк\,з}] + K_в \cdot \Delta Q_в . \qquad (4)$$

Параметр в квадратных скобках относится к предыдущему циклу решения задачи. Если в символе 25 при сравнении $Q_{вс\,з}$ с максимально допустимым $Q_в^{max}$ наблюдается $Q_{вк\,з} \le Q_в^{max}$, то сбрасывается признак ограничения по воздуху ($K_в$=0, символ 30). Таким образом, в символе 27 заданию на расход компрессорной станции присваивается максимально допустимое значение. В символе 28 устанавливается признак $K_в$=1 ограничения по расходу воздуха компрессорной станции. В символе 29 формируется задание на расход воздуха $Q_{вк\,з}=K_в\cdot Q_{вз}$. В символе 31 осуществляется вывод задания $Q_{вк\,з}$ на компрессорную станцию. В символе 32 устанавливается признак $T_в$=1 начала переходного процесса по расходу воздуха. В символе 33 сравнивается текущий расход воздуха в смеситель с заданным и при их равенстве сбрасывается признак $T_в$=0, иначе в символе 34 осуществляется анализ завершения переходного процесса. Если последний закончен $T_в$=0, то формируется новое управляющее воздействие (символ 23), т.е. производится контроль времени переходного процесса: если $T_в = T_в^{max}$, сбрасывается признак $T_в$=0 и задача завершается (символы 35…37). Здесь $T_в^{max}$ – максимальное время переходного процесса.

Алгоритм оптимального управления режимом гидравлического подъема приведен на рис. 4.

В символах 1, 2 производится начало решения задачи и вводится необходимая входная информация.

Определяется оптимальное значение концентрации $S_{опт}$ по заданному расходу $Q_{тз}$ и среднему размеру твердой фазы в d_T (символ 3). Затем производится анализ признака P (символ 4). Если P=0, т.е. требуется вывод системы гидроподъема на режим близкий к оптимальному в соответствии с расчетом, то осуществляется переход на символ 6, если P=1 – на символ 13 для продолжения поиска оптимального режима.

В символе 5 устанавливаются признаки: P=1 – начало регулирования концентрации по $S_{опт}$. Если i=0 – поиск минимума энергозатрат не производился (нулевой шаг), признак энергозатрат на подъѐм твѐрдого τ=0 – минимум энергозатрат не найден. Заданию на концентрацию гидросмеси S_3 присваивается расчетное значение и записывается в массив заданий (символ 6).

Контроль переходного процесса по регулированию концентрации осуществляется в символах 7…10. Переходный процесс считается законченным, если путь движения твердой фазы в подающем трубопроводе станет равным или больше длины L трубного става, или если концентрация в трубном ставе по всей длине будет одинакова $S_1=S_2$. В нашем случае S_1 – это концентрация твердого в подающем трубопроводе после питателя-дозатора, а S_2 – концентрация на выходе транспортного трубопровода. Длина пути l определяется через скорость движения твердых частиц в трубопроводе V_T.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

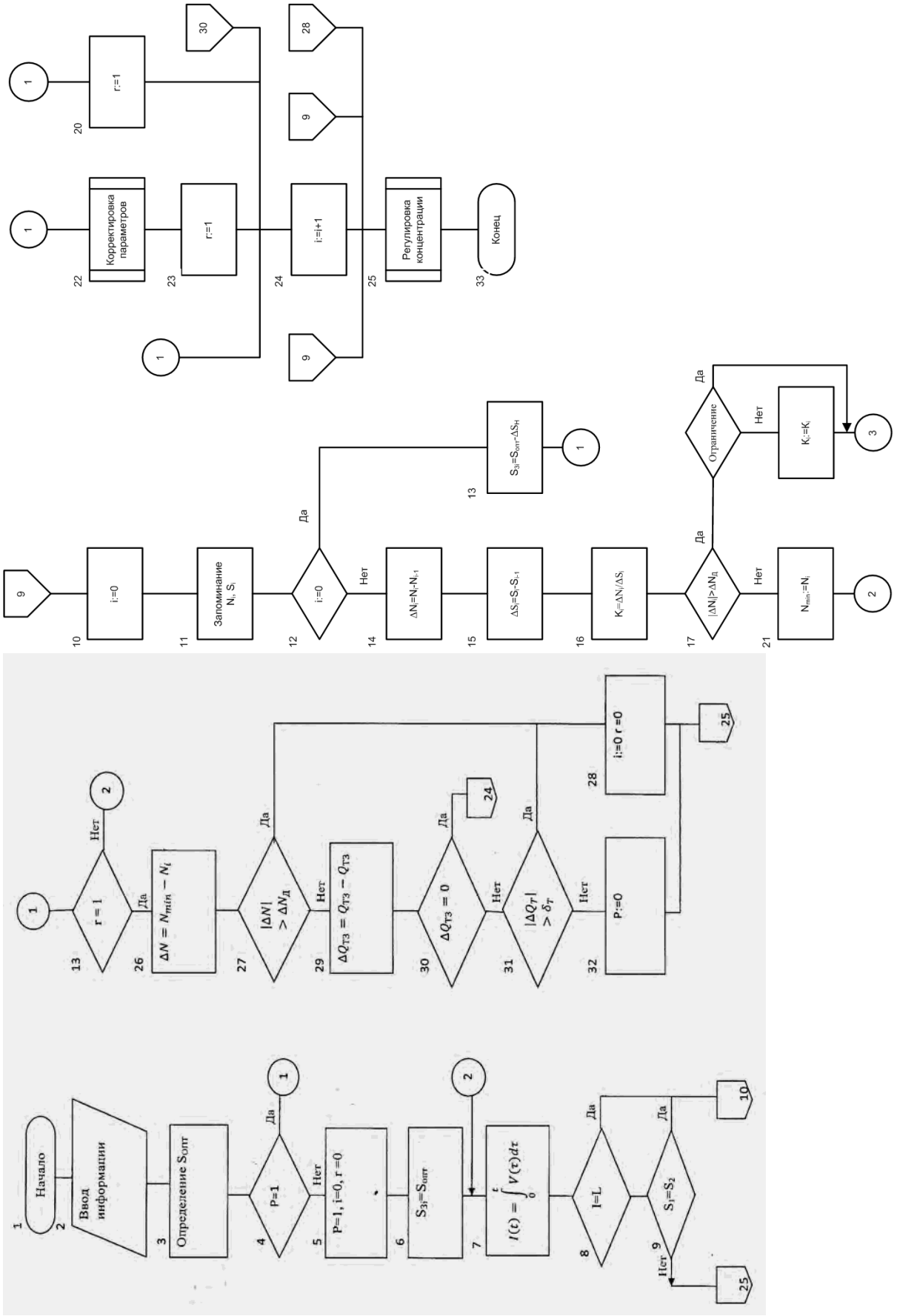


Рис. 4. Алгоритм оптимального управления режимом гидроподъема

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Если переходный процесс закончен, производится переход на символ 11, если нет – на символ 25. В символе 13 при ненахождении минимума энергозатрат (τ=0) выполняется переход на символ 9, если найден (τ=1) – на символ 30. Запоминается текущее значение мощности N, потребляемой компрессорной станцией, и среднее значение концентрации S на длине трубопровода на i-ом шаге (символ 11). Если i=0 (поиск минимума не производится) (символ 12), осуществляется первый шаг поиска путем изменения задания на концентрацию $S_{iз}$ в символе 13. Если $i\neq0$ – переход на символ 14. Начальный шаг поиска по концентрации – $\Delta S_н$.

Рассчитывается приращение мощности ΔN между двумя соседними шагами поиска (символ 14). В символе 15 рассчитывается изменение средней концентрации между двумя соседними шагами поиска и определяется коэффициент K (символ 16), характеризующий скорость изменения мощности от изменения концентрации на текущем шаге поиска. Анализ приращения мощности ΔN производится в символе 17. Если $|\Delta N_i|>\Delta N_д$ (где $\Delta N_д$ – заданное допустимое приращение мощности), то производится проверка ограничения по расходу гидросмеси (символ 18) и, при его наличии, меняется знак коэффициента K (символ 19), а при отсутствии – выполняется расчет задания на концентрацию $S_{iз}$ (символ 20). Если $|\Delta N_i|\leq\Delta N_д$ – производится переход на символ 21, в котором текущее значение мощности запоминается как некоторое минимальное $N^{\min}$, соответствующее оптимальному режиму. Производится корректировка массива оптимальных параметров для установки (символ 22). В число корректируемых параметров входят: средняя по длине подающего трубопровода концентрация S_i, расход твердого на входе в трубопровод и средний размер частиц твердой фазы. Устанавливается признак τ=1 работы на оптимальном режиме (символ 23) и модифицируется шаг поиска (символ 24). Выполняется задача регулирования концентрации в соответствии с заданием (символ 25) и производится расчет приращения текущего значения мощности по отношению к $N^{\min}$ (символ 26). Анализ приращения мощности происходит в символе 27. Если $|\Delta N|>\Delta N_д$, то устанавливается признак i=0 первого шага поиска и признак τ=0 поиска нового минимума мощности (символ 28). Если $|\Delta N|\leq\Delta N_д$ – производится переход на символ 22. Здесь производится анализ задания $Q_{mз}$ на расход твердой фазы (символы 29…32). Если $Q_{mз}$ изменилось и его приращение по отношению к предыдущему шагу поиска больше заданного δ_T, устанавливается признак P=0 регулирования концентрации по расчетному, близкому к оптимальному, значению, а если нет – переход на символ 28. В символе 33 завершается шаг решения задачи.

Выводы

Показано, что при пуске эрлифта в работу и выходе его на рабочий режим подача компрессорной станции уменьшается до расчетного значения за счет автоматизированной системы управления компрессорами.

Штатный останов эрлифта производится путем уменьшения задания на расход сжатого воздуха и последующего управления положением продувочного вентиля до заполнения водой воздухопровода.

Список литературы

1. Малеев, В.Б. Характеристика задач управления глубоководным эрлифтным гидроподъемом полезных ископаемых / В.Б. Малеев, А.А. Кудрявцев // Сборник научных трудов ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ». – 2018. – №12 (55). – С. 71-76.
2. Малеев. В.Б. Автоматическое регулирование концентрации гидросмеси в подъемной трубе эрлифта / В.Б. Малеев, Н.И. Скорынин, А.А. Кудрявцев // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2019. – №2(16). – С. 46-52.
3. Работа компрессора на эрлифтный гидроподъем при осушении скважин и стволов / В.Б. Малеев [и др.] // Научные труды ДонНТУ. Серия горно-геологическая. – 2016. – №2(25). – С. 24-34.
4. Wakton, W.H. Aerodynamic Capture of Particles / W.H. Wakton, A. Woolcock. – N.Y.: Pergamon, 1960. – 129 p.
5. Soo, S.L. Fluid Dynamics of Multiphase System// Proceedings of Symposium on Interaction between Fluids and Particles, London, 1962. – London: Ins. of Chem. Eng., 1962. – P. 50.
6. Peskin, R.L. Particle-Particle and Particle-Fluid Interactions in Two-Phase Turbulent Flow // Conference Proceedings of Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute, Stanford U.P., Stanford, Calif., 1960. – P. 114-121.

V.B. Maleyev /Dr. Sci. (Eng.)/, N.I. Skorynin /Cand. Sci. (Eng.)/, A.A. Kudryavtsev
Donetsk National Technical University (Donetsk)

AUTOMATED CONTROL ALGORITHMS OF STARTING AND STOPPING THE HYDRAULIC AIRLIFT

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Background. *The paper presents a new solution for automated control of starting and stopping of hydraulic airlift, which is a complex object of management and control, characterised by the following features: a wide range of disturbances; distribution and remoteness of control points and control units from the control panel; uncontrollability of some factors and significant delays in the measurement and control channels. It should be noted that the control of the airlift installation for lifting the hydraulic mixture is mainly determined by changing the supply of compressed air to the mixer, which largely determines the modes of starting and stopping the airlift.*

Materials and/or methods*. The input information of the subsystem of automated process control of iron-manganese concretions hydraulic airlift required for the solution of the problems under consideration includes a variable and conditionally constant information. The latter contains the constant and tuning parameters of the control system, and the variable – the parameters coming from the sensors. The variable inputs of the considered set of tasks define: the volume flow of air into the airlift mixer and its pressure at the inlet to the mixer; power consumed by the compressor station; the volume flow of slurry in the transport pipeline; the density of slurry at the control points of the transport pipeline; solid flow at the outlet of the dispenser; setting the flow rate of slurry; setting the concentration. The start-up process begins with the input of the conditional-constant information (UPI), which includes values and permissible differential pressures in the mixer, design parameters of air, physicomechanical characteristics of a component of the slurry, geometrical immersion mixer, etc. The value of the specified capacity of the nodule lifting system entered and the critical flow rate of the slurry in the feed pipe calculated.*

Results. *The start-up process begins with the input of conditionally constant information, which includes the values and permissible pressure drops in the mixer, the design parameters of the air, the physical and mechanical characteristics of the slurry, the geometric parameters of the submersible mixer, etc.*

Conclusion*. The regular stop of the airlift is made by reducing the task for the consumption of compressed air and then controlling the position of the purge valve before filling the air pipeline with water.*

Keywords: *hydraulic mixture, hydraulic airlift, compressed air, mixer.*

Сведения об авторах

В.Б. Малеев
SPIN-код: 7651-9977
Телефон: +380 (71) 321-97-68
Эл. почта: teormeh@fimm.donntu.org

А.А. Кудрявцев
SPIN-код: 5524-4958
Телефон: +380 (71) 302-85-39
Эл. почта: tmech_kaa@mail.ru

Н.И. Скорынин
SPIN-код: 1869-5382
Телефон: +380 (71) 330-18-85
Эл. почта: teormeh@fimm.donntu.org

Статья поступила 25.04.2019 г.
© В.Б. Малеев, Н.И. Скорынин, А.А. Кудрявцев, 2019
Рецензент д.т.н., проф. А.П. Кононенко



ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

УДК 629.113 + 621.1.01

Н.В. Савенков /к.т.н./, В.Г. Скрипкарь, Л.Э. Энтина
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» (Макеевка)

ПОВЫШЕНИЕ ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ГОРОДСКИХ АВТОБУСОВ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ НА МАРШРУТАХ

Предложена методика повышения топливной экономичности автомобилей категории M_3 на примере автобуса «Донбасс». Показано влияние значений передаточных чисел коробки передач на согласование режимов работы силовой установки с режимами движения на городских пассажирских маршрутах.

Ключевые слова: *автомобиль категории M_3, городской маршрут, оптимизация, путевой расход топлива, передаточное число.*

Постановка проблемы

Определяющим показателем эффективности эксплуатации парка автобусов, при условии обеспечения обязательных требований по соблюдению качества и безопасности обслуживания пассажиров, является себестоимость перевозок.

Значительное влияние на этот показатель оказывают затраты на топливо. Среди известных конструкционных мероприятий для коммерческих автомобилей рациональным является направление по повышению топливной экономичности за счет согласования режимов работы двигателя и трансмиссии с заданными условиями движения. Это позволит повысить среднее значение общего КПД силовой установки автотранспортного средства на маршруте и, как следствие, уменьшить путевой расход топлива.

Данное направление требует исследования фактических режимов движения на городских пассажирских маршрутах.

Анализ последних исследований и публикаций

Направление по повышению топливной экономичности автомобиля на маршруте за счет рационального выбора конструкционных и режимных параметров силовой установки (двигатель и трансмиссия) является эффективным, так как связано с рабочими процессами узлов и агрегатов, которые характеризуются наибольшими потерями энергии – общий КПД двигателя и трансмиссии автобуса может варьироваться от 0,01 до 0,3 [1].

Рассматриваемый подход может реализовываться различными способами. Для автотранспортных средств, оснащенных ступенчатой механической трансмиссией, повышение общего КПД силовой установки можно достичь путем оптимизационного поиска рационального ряда передаточных чисел промежуточных передач [2]. Это обеспечит улучшение свойств топливной экономичности в принятых режимных условиях эксплуатации при сохранении на требуемом уровне скоростных и экологических качеств.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является разработка метода повышения топливной экономичности отечественных автобусов на пассажирских маршрутах за счет рационального выбора параметров трансмиссии.

Для достижения поставленной цели решены такие задачи: определение и обоснование критерия эффективности процесса движения автомобиля на пассажирском маршруте; выбор оптимизационных параметров повышения топливной экономичности; разработка и обоснование эксплуатационных режимов движения; построение нагрузочно-скоростных характеристик двигателя; расчет потерь мощности в силовой установке; определение функции требуемой мощности, необходимой для движения автобуса в эксплуатационных условиях; оптимизационный расчет топливной экономичности; анализ полученных результатов и разработка рекомендаций по повышению топливной экономичности.

Основной материал исследования

В качестве критерия эффективности процесса движения определено интегральное количество топлива, израсходованное на маршруте за один цикл движения автобуса (от отправной точки до конечной и обратно) в перерасчете на 100 км пути:

$$A = \frac{1}{36 \cdot \rho_T \cdot S_M} \int_{t_h}^{t_k} G_q \, dt, \qquad (1)$$

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

где t_h и t_k соответственно время начала и конца маршрута (один цикл движения), с; ρ_T – плотность топлива, кг/дм^3; S_M – протяженность маршрута (одного цикла движения), м; $G_Ч$ – функция часового расхода топлива, кг/ч; t – текущее время движения в ездовом цикле, с.

Для автомобилей, оснащенных механической ступенчатой трансмиссией, задача согласования режимов работы ДВС и трансмиссии с режимами движения может реализоваться относительно просто – в качестве оптимизационных параметров могут быть выбраны: количество передач, значения передаточных чисел (ПЧ) коробки передач (диапазон и плотность ряда соответственно), а также передаточного числа главной передачи.

Наиболее рациональным с точки зрения соотношения трудоемкости и стоимости модернизации и ожидаемого полезного эффекта является выбор в качестве оптимизационных параметров передаточных чисел промежуточных передач. Это объясняется тем, что передаточное число низшей передачи принимается по условию преодоления максимального дорожного сопротивления при минимальной скорости, а ПЧ высшей передачи – по достижению максимальной скорости либо с целью обеспечения требуемого уровня топливной экономичности при заданной скорости движения.

Наиболее простым и распространенным способом построения модификационных рядов автомобилей с различными ПЧ трансмиссии является применение главной передачи с различными передаточными числами.

При таком подходе соотношения между смежными передаточными числами коробки передач являются постоянными [3], а поэтому изменение ПЧ главной передачи характеризуется наименьшей эффективностью по улучшению топливно-экономических эксплуатационных свойств автомобиля в комплексе нестационарных режимов движения [2].

Ограничения, принятые при выборе рациональных ПЧ промежуточных передач:

– обеспечение баланса мощности в трансмиссии в каждый момент времени движения на маршруте;

– текущие значения параметров регулирования ДВС лежат в допустимых диапазонах: текущая частота вращения коленчатого вала находится между минимально допустимой и номинальной, коэффициент использования мощности принимает значения от 0 до 1;

– значения передаточных чисел промежуточных передач лежат в диапазоне, расположенном между арифметическим и гиперболическим законами распределения рядов передаточных чисел трансмиссии [2].

Экспериментальное определение режимов движения выполнено на пассажирском маршруте № 96 «АС ЦУМ – АС Щетинина», соединяющего города Макеевку и Донецк. Для проведения эксперимента применены GPS-трекер и программа GPS logger, которая через заданный промежуток времени (шаг) фиксировала скорость автобуса и его координаты. Путем дополнительных вычислений получены значения ускорений и последующих параметров тягового расчета.

В качестве программного обеспечения для построения математической модели режимов движения выбрана система компьютерной алгебры Mathcad.

Для создания непрерывной гладкой функции скорости движения автобуса на маршруте (V, м/с) в зависимости от времени: $V=f(t)$ применен алгоритм интерполяции кубическим сплайном [4]. Результаты показаны на рис. 1.

На рисунке точка начала маршрута t=0 с, точка завершения маршрута t=3527 с. Верхний график соответствует движению от автостанции «ЦУМ» (г. Макеевка) до автостанции «Щетинина» (г. Донецк), нижний график – возвратное направление.

Изменение высоты над уровнем моря (H_M) на рассматриваемом маршруте приведено на рис. 2. Данные получены с помощью карты высот над уровнем моря и аппроксимированы функцией линейного сплайна [4].

На рисунках показан профиль в прямом направлении (от АС «ЦУМ» до АС «Щетинина»). В результате вычислений получены характеристики: $H_M=f(S)$ и $H_M=f(t)$.

Расчет характеристики относительного уклона дороги $i=f(t)$, необходимой для последующего численного моделирования (ЧМ) процесса движения автомобиля по маршруту в программной среде, выполнен на основании зависимости: $i=f(t)=(H_{M(p+1)}-H_{M(p)})/(S_{p+1}-S_p)$, где p – порядковый номер промежуточных точек в соответствии с выбранным шагом вычисления.

Основные паспортные показатели и параметры двигателя ЗМЗ-5234.10, применяемого на рассматриваемом в исследовании автобусе «Донбасс», приведены в табл. 1 [5]. Математическое описание соответствующих нагрузочно-скоростных характеристик выполнено на основании классической теории автомобиля [6].

Соответственно, зависимость эффективной мощности от частоты вращения коленчатого вала и нагрузки имеет вид:

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

$$N_e = f(k,n) = k \cdot N_{e\max} \frac{n}{n_N} \times \times \left[a + b \cdot \frac{n}{n_N} + c \cdot \left(\frac{n}{n_N} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где $N_{e\max}$ – максимальная мощность ДВС (при номинальной частоте вращения коленчатого вала n_N и при полной подаче топлива), кВт; k – коэффициент использования мощности; a, b, c – полиномиальные коэффициенты, зависящие от типа двигателя.

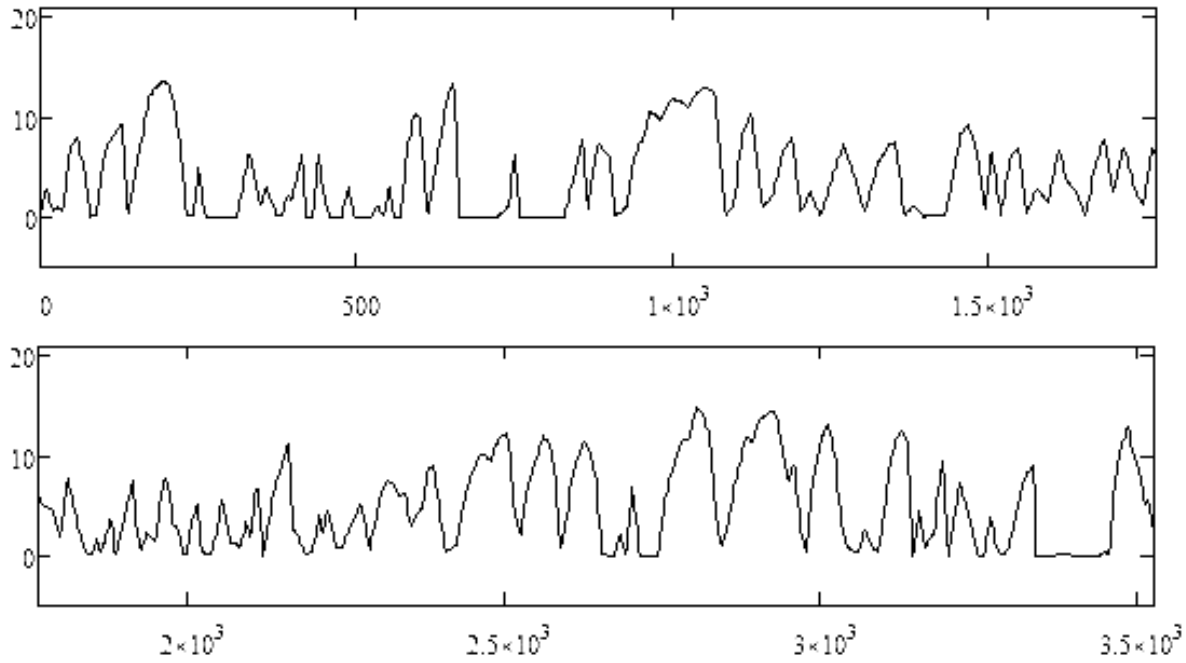


Рис. 1. Экспериментальная зависимость скорости движения автобуса «Донбасс» от времени на маршруте № 96 г. Макеевки

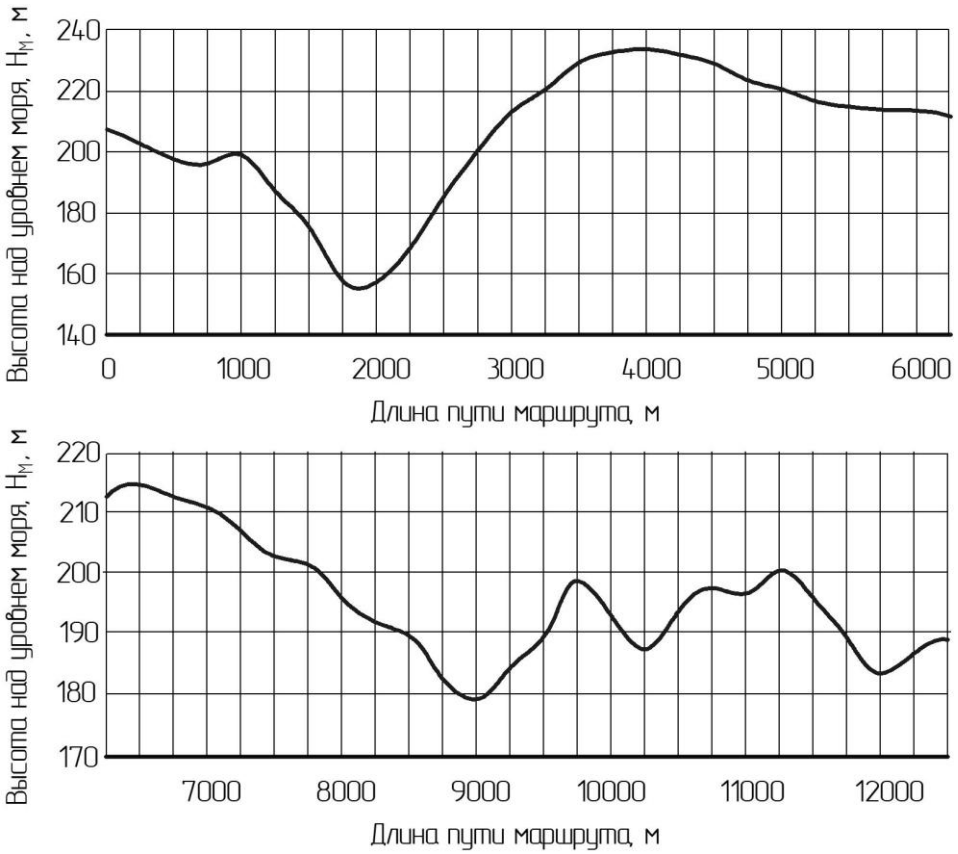


Рис. 2. Профиль дороги на маршруте № 96

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Табл. 1. Основные характеристики двигателя ЗМЗ-5234.10

№ п/п	Показатели и параметры	Ед. изм.	Обозначения	Значения
1	Номинальная эффективная мощность	кВт	$N_{e\max}$	95,5
2	Номинальная частота вращения	мин$^{-1}$	n_N	3300
3	Максимальный крутящий момент	Нм	$M_{e\max}$	314
4	Частота вращения при максимальном крутящем моменте	мин$^{-1}$	n_M	2250
5	Минимальный удельный расход топлива	г/кВтч	$g_{e\min}$	279
6	Количество и расположение цилиндров	-	-	V8
7	Диаметр цилиндра и ход поршня	мм	D/S	92/88
8	Степень сжатия	-	ε	7,6
9	Рабочий объем	дм^3	V_h	4,67
10	Экологический класс	-	-	ГОСТ Р41.83

Параметр k в функции (2) учитывает долю частичной нагрузки и представляет собой отношение текущей развиваемой ДВС мощности к максимальной (по внешней скоростной характеристике) при текущей частоте вращения: $k=N_e/N_{eBCX}$. Либо через крутящий момент: $k=M_e/M_{eBCX}$. Коэффициент k в процессе движения автомобиля изменяет значения от 0 до 1.

Полиномиальные коэффициенты вычислены на основании значений коэффициента приспособляемости по крутящему моменту ($K_M=M_{e\max}/M_{eN}$) и коэффициента приспособляемости по частоте вращения ($K_\omega=n_N/n_M$), где M_{eN} – крутящий момент на номинальном режиме: $M_{eN}=9550\cdot N_{e\max}/n_N$. Таким образом: $a=(K_M\cdot K_\omega\cdot(2-K_\omega)-1)/(K_\omega\cdot(2-K_\omega)-1)$, $b=-2\cdot K_\omega\cdot(K_M-1)/(K_\omega\cdot(2-K_\omega)-1)$ и $c=K_\omega^2\cdot(K_M-1)/(K_\omega\cdot(2-K_\omega)-1)$. Результаты расчетов приведены в табл. 2. Полученные данные согласуются с ранее обоснованными ограничениями применимости функции (2) [7].

В соответствии с [6] универсальная функция нагрузочно-скоростной характеристики удельного расхода ДВС представлена выражением:

$$g_e = f(k,n) = g_{eN}(a_u - b_u\cdot k + c_u\cdot k^2)\times \times\left[\beta_0 + \beta_1\cdot\frac{n}{n_N} + \beta_2\cdot\left(\frac{n}{n_N}\right)^2\right], \text{г/кВтч}, \quad (3)$$

где a_u, b_u, c_u, β_0, β_1, β_2 – полиномиальные коэффициенты для учета влияния на g_e нагрузочного и скоростного режима ДВС. Принятые (в соответствии с рекомендациями [6]) значения приведены в табл. 3.

Значение эффективного удельного расхода топлива на номинальном режиме работы ДВС g_{eN} выбрано по условию равенства минимального значения $g_{e\min}$ по внешней скоростной характеристике величине $g_{e\min}$ (см. табл. 1).

В графическом виде функции (2) и (3) показаны на рис. 3. Поверхности построены с учетом границ допустимых значений параметров регулирования ДВС: n и k.

Входными характеристиками в расчет критерия (1) являются: нагрузочно-скоростная характеристика эффективной мощности и удельного расхода топлива (2), (3); характеристика потерь в трансмиссии (η_T), а также характеристики мощности сопротивления движению (потребной эффективной мощности ДВС), определяемой на основании уравнения мощностного баланса [6] с учетом составляющих сопротивления дороги, воздуха и инерции:

$$N_T = f(t) = V(t)\cdot\left(m\cdot g\cdot\psi(t) + W\cdot(V(t))^2 + m\cdot j(t) + J\cdot j(t)/r_K^2\right)\cdot(1000\cdot\eta_T)^{-1}, \text{кВтч}, \quad (4)$$

где $V(t)$ – функция скорости автомобиля от времени движения на маршруте (см. рис.1); $j(t)$ – функция продольного ускорения автобуса от времени движения на маршруте $j(t)=dV(t)/dt$; $\psi(t)$ – функция коэффициента сопротивления движению $\psi(t)=f+i(t)$, f – коэффициент сопротивления качению; m – испытательная масса автомобиля, кг; g – ускорение свободного падения; W – фактор обтекаемости, кг/м; J – момент инерции вращающихся масс автомобиля, приведенный к ведущему колесу, кг·м^2; r_K – радиус качения ведущего колеса, м.

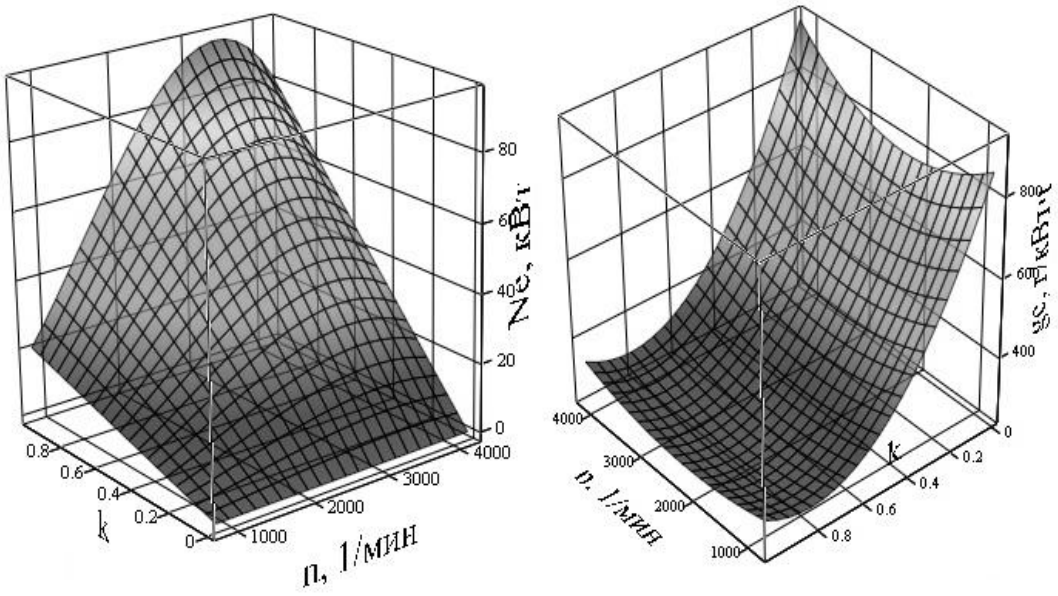
Табл. 2. Основные параметры функции эффективной мощности

M_N, Нм	K_ω	K_M	c	b	a
276,3	1,46	1,13	–1,3	1,827	0,5

Табл. 3. Параметры функции эффективного удельного расхода топлива

g_{eN}, г/кВтч	a_u	b_u	c_u	β_0	β_1	β_2
291	2,75	4,61	2,86	1,23	–0,792	0,58

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org



а б

Рис. 3. Нагрузочно-скоростные характеристики эффективных показателей ДВС ЗМЗ-5234.10: *а* – мощность; *б* – удельный расход топлива

Значения параметров функции (4) приведены в табл. 4.

Дальнейшим шагом ЧМ процесса движения автомобиля на маршруте является выбор комплекса условий, обеспечивающих принятие решений по переключению передач и, как следствие, разработка функции $U_m=f(t,U_1,U_2,U_3,U_4,U_5)$, где U_m – текущее ПЧ коробки передач при движении автобуса на маршруте, $U_1 \dots U_5$ – соответственно значения ПЧ от низшей до высшей передач коробки.

Известно множество подходов к выбору моментов переключения передач при движении в таких режимах, на которых регламентирована зависимость скорости от времени, но не установлены конкретные условия для изменения текущей передачи [8,9]. Например, переключение может осуществляться по достижении определенной скорости либо числа оборотов коленчатого вала ДВС. Критериями для этого могут также служить: требуемый запас мощности, минимальный путевой расход топлива на маршруте, максимальная экономичность или комплексные критерии эффективности. В настоящей работе критерием для смены передачи выбрано условие приоритетного движения на высшей передаче в коробке передач при обеспечении соблюдения в каждый момент времени баланса мощности при частоте вращения коленчатого вала, входящей в рабочий диапазон (от минимальной на режиме холостого хода до номинальной n_N).

Табл. 4. Параметры автобуса «Донбасс», определяющие сопротивление движению

№ п/п	Параметр	Ед. изм.	Обозначение	Значения
1	Коэффициент сопротивления качению	-	f	0,014
2	Фактор обтекаемости	кг/м	W	2,13
3	Радиус качения ведущего колеса	м	r_K	0,389
4	Момент инерции вращающихся масс, приведенный к ведущему колесу	кг·м^2	J	10,02
5	Размерность шин ведущих колес	-	$B/H\ D$	245/70 19,5
6	Максимальная скорость	м/с	V_{max}	23,61
7	КПД трансмиссии	-	η_T	0,9

Примечание:

– значение f выбрано для сухого асфальтобетонного шоссе [6];

– W определен выражением: $0{,}5\cdot\rho_B\cdot C_X\cdot F$, где ρ_B – плотность воздуха, кг/дм^3; C_X – коэффициент обтекаемости АТС встречного потока воздуха; F – площадь поперечного сечения автобуса (мидель); величина W определена с помощью ЧМ процесса движения автобуса с максимальной скоростью по уравнению (4) при j=0 и $V=V_{max}$;

– радиус r_K при отсутствии буксования, а также с учетом ряда допущений определен зависимостью: $r_K=(\lambda_{CM}\cdot B\cdot H/100+D\cdot 25{,}4/2)/1000$, где λ_{CM} – коэффициент смятия шины под нагрузкой, λ_{CM}=0,9.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

В ходе ЧМ значение критерия определялось на основании зависимости:

$$A = \frac{1}{10^3 \cdot 36 \cdot \rho_T \cdot S_M \cdot \eta_T} \times$$

$$\times \int_{t_h}^{t_k} g_e(t, U_m, U_0) \cdot N_T(t) dt \text{, л/100 км.} \qquad (5)$$

Функция $g_e=f(t,U_m)$, г/кВтч, характеризует текущее значение удельного расхода топлива ДВС при времени движения t. Эта зависимость получена на основании рассмотренного выражения (3) с учетом режимов работы силовой установки на маршруте: $n=f(t,U_m)=V(t)\ U_m \cdot U_0/(0{,}105 \cdot r_K)$, $k=f(t,U_m)=N_T(t)/N_e(1,n(t,U_m))$.

Функция значений ПЧ коробки передач $U_m=f(t,U_1,U_2,U_3,U_4,U_5)$ автобуса при его движении на маршруте и оснащенного, в качестве примера, серийной трансмиссией, приведена на рис. 4.

Таким образом, изменяя значения оптимизационных параметров (U_2, U_3, U_4) с учетом принятых ограничений ($N_T=N_e$, $n\epsilon[n_{\min}; n_N]$, $k\epsilon$ [0;1]), выполнялась оценка изменения путевого расхода топлива, рассчитанного в соответствии с целевой функцией критерия (5). Процедура оптимизационного поиска рациональных значений параметров осуществлялась при помощи функции Minimize системы компьютерной алгебры Mathcad [10].

В соответствии с зависимостью (5) в работе рассчитаны рациональные значения передаточных чисел промежуточных передач трансмиссии автобуса при различных значениях его фактической массы и обеспечивающие минимальный расход топлива на рассматриваемом маршруте. Полученные данные, а также соответствующие значения расхода топлива приведены в табл. 5.

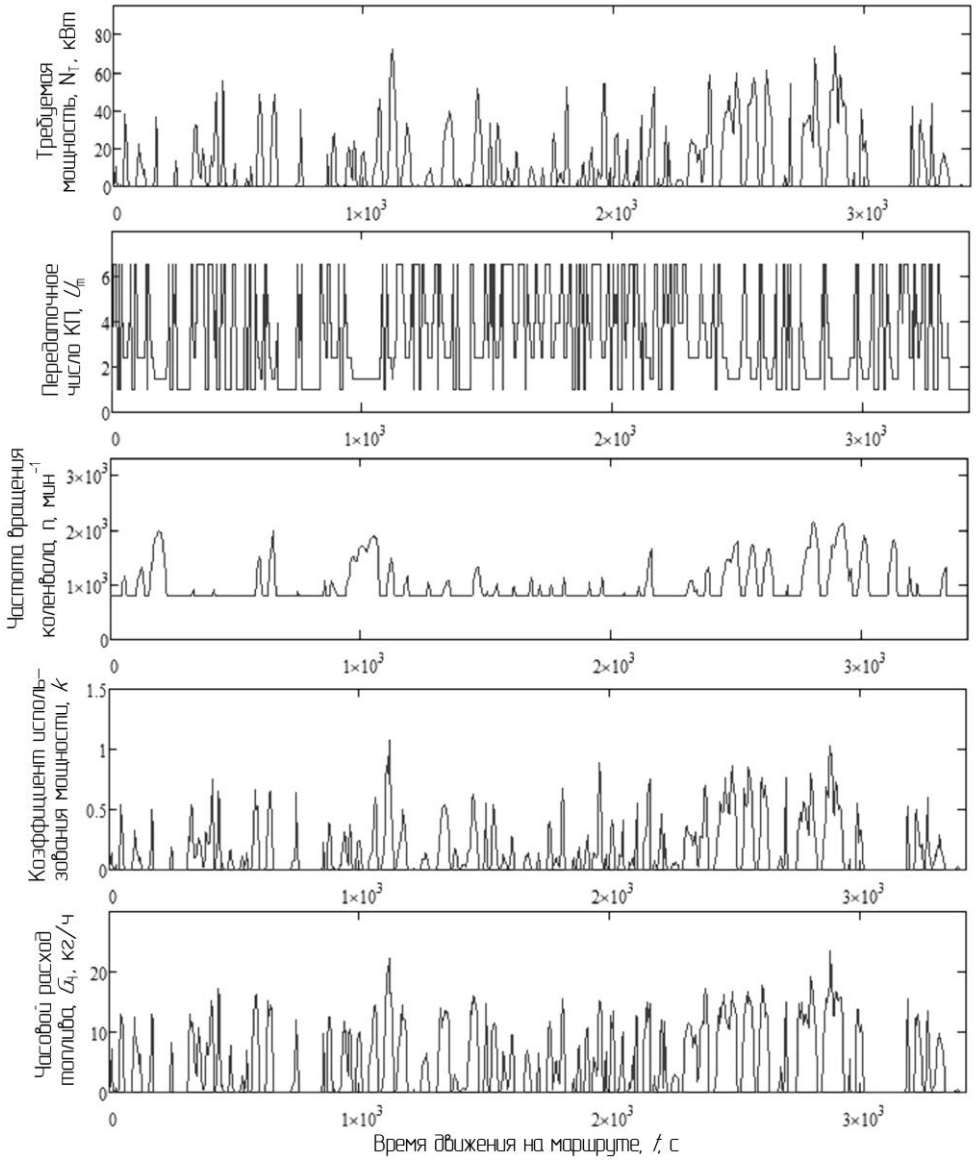


Рис. 4. Результаты расчета параметров автобуса «Донбасс», оснащенного серийной трансмиссией, полученные численным моделированием движения по маршруту № 96

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Табл. 5. Результаты оптимизационного расчета

№ ряда	Значения передаточных чисел промежуточных передач			Путевой расход топлива	Экономия по отношению к серийному ряду, %	Фактическая (испытательная) масса автобуса, кг
	U_2	U_3	U_4	A, л/100 км		m
Серийный	3,933	2,376	1,442	24,4	0 %	7300*
				25,72		8000
				26,39		8500
1	4,5	2,05	1,268	23,356	4,3	7300*
2	3,8	2,255	1,413	25,212	2	8000
3	3,915	2,36	1,439	26,125	1	8500

Примечание:

*Масса автобуса без стоячих пассажиров.

Основываясь на данных, приведенных в табл. 5, можно сделать вывод о том, что результат оптимизационного расчета в значительной степени зависит от величины фактической массы автобуса (это является основополагающим фактором затраты энергии при движении). Фактическая масса автобуса обусловила количество перевозимых пассажиров. Данная величина не является постоянной и зависит от ряда факторов, в числе которых: количество автобусов на маршруте, время суток, день недели, время года, а также другие календарные и социальные факторы. В соответствии с [9] автомобили категории M_3 подвергают испытаниям на предмет определения топливно-экономичных свойств при испытательной массе, равной полной массе. Рассматриваемый стандарт допускает выполнение испытаний при величине фактической массы, отличающейся от полной, в обоснованных случаях.

Таким образом, так как маршрут № 96 обладает относительно дифференцированным пассажиропотоком, вопрос о выборе величины испытательной массы автобуса требует дополнительных статистических данных. Соответственно, в первом приближении в качестве рекомендаций, обоснованных в настоящей работе, предлагается ряд передаточных чисел № 1 из табл. 5, который получен в результате оптимизационного расчета при половине грузоподъемности.

Выводы

В работе подтвержден широкий информационно-аналитический потенциал использования расчетно-экспериментального метода исследования процессов в области повышения топливной экономичности автобусов в конкретных эксплуатационных условиях.

Расчеты, основанные на результатах системно проведенных экспериментальных исследований условий, параметров и режимов движения автобуса в пределах выбранного городского маршрута, позволяют принять технические и организационные решения в контексте повышения топливной экономичности за счет применения рационального ряда передаточных чисел коробки передач. В частности, на основании оптимизационного расчета движения автобуса ПАЗ-3204 «Донбасс» на маршруте № 96 между городами Донецком и Макеевкой рекомендован рациональный ряд передаточных чисел промежуточных передач: U_2=4,5; U_3=2,05; U_4=1,268. При прочих равных это обеспечивает экономию топлива на 4,3 % по отношению к серийному ряду ПЧ.

Задача внедрения рационального ряда передаточных чисел в конструкцию серийной коробки передач требует замены 3-х зубчатых пар вторичного и промежуточного валов. Предложенный в работе подход и разработанные рекомендации позволяют улучшить топливно-экономические свойства автобуса при его движении в конкретных эксплуатационных условиях.

Список литературы

1. Senft, J.R. Mechanical Efficiency of Heat Engines. – New York: Cambridge University Press, 2007. – 189 p.
2. Newman, K. Modeling the effects of transmission gear count, ratio progression, and final drive ratio on fuel economy and performance using ALPHA / K. Newman, P. Dekraker // SAE Technical Paper 2016-01-1143 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-10/documents/2016-01-1143-model-trans-gear-count-ratio-prog-final-drive-ratio-using-alpha_0.pdf
3. Automotive engineering. Powertrain, chassis system and vehicle body / Edited by David A. Crolla. – Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2009. – 835 p.
4. Горожанкин, С.А. Методики для аппроксимации зависимостей нескольких переменных в программной среде MS Excel и Mathcad / Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управле-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

ние // С.А. Горожанкин, А.А. Шитов, Н.В. Савенков. – 2016. – №3(247). – С. 35-47.
5. Автобусы семейства ПАЗ 3203. Руководство по эксплуатации. 3204-3902010 РЭ. – ООО «Павловский автобусный завод», 2015. – 44 с.
6. Литвинов, А.С. Автомобиль: Теория эксплуатационных свойств: Учебник для вузов по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство» / А.С. Литвинов, Я.Е. Фаробин. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
7. Савенков, Н.В. Универсальный способ описания внешних скоростных характеристик автомобильных ДВС, обладающих «полкой» крутящего момента / Н.В. Савенков, В.В. Понякин, В.В. Бибиков // Журнал ААИ. – 2018. – №3(110). – С. 17-21.
8. Предложение по новым глобальным техническим правилам, касающимся всемирных согласованных процедур испытания транспортных средств малой грузоподъемности, ЕЭК ООН 2014 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2014/wp29/ECE-TRANS-WP29-2014-027e.pdf
9. ГОСТ Р 54810-2011. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2012. – 23 с.
10. Кирьянов, Д.В. Mathcad 14. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 704 с.

N.V. Savenkov /Cand. Sci. (Eng.)/, V.G. Skrypkar, L.E. Entina
Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture (Makeevka)

IMPROVING THE FUEL ECONOMY OF THE CITY BUSES BASED ON THE ANALYSIS OF DRIVING MODES ON THE PASSENGER ROUTES

Background. *The cost of passenger transportation, subject to mandatory requirements for compliance with the quality and safety of service, is a determining indicator of the efficiency of the fleet of buses. This indicator is complex. A significant proportion of it is due to fuel costs.*
The paper proposes a solution to the problem of improving the fuel-efficient properties of buses by increasing the average value of the total efficiency of the power plant of the vehicle on the route by harmonising operating modes of the engine with the operating conditions.
Materials and/or methods. *Based on the study of the load-speed characteristics of the engine and the conditions of bus traffic on one of the passenger routes with the help of GPS-tracker the appropriate mathematical models created. The solution to the problem carried out by the calculation and experimental method by carrying out a numerical experiment set in the software environment.*
Results. *As a result, for the domestic bus "Donbass", selected as an example, proposed a set of structural measures aimed at determining the rational parameters of the transmission, ensuring a reduction in fuel consumption in operating conditions.*
Conclusion. *The task of implementing a rational number of gear ratios in the design of the serial gearbox requires the replacement of 3 gear pairs of secondary and intermediate shafts. The proposed approach and developed recommendations can improve the fuel and industrial properties of the bus when it moves in specific operating conditions.*

Keywords: *category M3 vehicle, city route, optimisation, route fuel consumption, gear ratio.*

Сведения об авторах

Н.В. Савенков
ORCID iD: 0000-0003-3803-9528
Телефон: +380 (71) 370-67-51
Эл. почта: N.V.Savenkov@donnasa.ru

Л.Э. Энтина
ORCID iD: 0000-0003-4418-3294
Телефон: +380 (71) 322-51-57
Эл. почта: liannavila@yandex.ru

В.Г. Скрипкарь
ORCID iD: 0000-0002-7699-4035
Телефон: +380 (71) 342-09-15
Эл. почта: nasa.autos@gmail.com

Статья поступила 07.05.2019 г.
© Н.В. Савенков, В.Г. Скрипкарь, Л.Э. Энтина, 2019
Рецензент д.т.н., проф. В.П. Кондрахин

УДК 622.232.72.063

О.Е. Шабаев /д.т.н./, В.Г. Нечепаев /д.т.н./, Е.Ю. Степаненко /к.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)
П.П. Зинченко
Институт горного дела и геологии ГОУ ВПО «ДонНТУ» (Донецк)

УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ ШНЕКОВЫХ ОЧИСТНЫХ КОМБАЙНОВ ОТ ИХ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЬНЫХ И НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На основе разработанной математической модели применительно к рассматриваемым условиям проведен модельный эксперимент, позволивший установить характер и параметры влияния на погрузочную способность шнековых очистных комбайнов их режимных и геометрических параметров. Выделены три диапазона скорости перемещения, характеризующиеся существенными различиями рабочего процесса транспортирования и выгрузки разрушенного угля на забойный конвейер. Показано, что при определении рациональных значений режимных параметров по критерию максимальной технической производительности необходимо учитывать влияние на погрузочную способность комбайнов режимных и геометрических параметров их шнековых исполнительных органов.

Ключевые слова: *очистной комбайн, шнековый исполнительный орган, погрузочная способность, процесс выгрузки угля, циркуляция угля, эффективность погрузки, мощность на погрузку.*

Постановка проблемы

В настоящее время уголь является основным энергоносителем, способным полностью удовлетворить потребности Донецкого региона, – его промышленные запасы, по данным ДонУГИ, составляют порядка 6,84 млрд. т [1].

Горно-геологические и горнотехнические условия залегания угольных пластов Донбасса характеризуются как весьма сложные – порядка 83,2 % пластов имеют мощность 0,55…1,20 м [1]. В этих условиях наиболее перспективной мировой тенденцией является выемка углей с использованием струговых механизированных комплексов. Комбайновая выемка применяется преимущественно в случаях, когда применение стругов ограничивается горно-геологическими условиями. В условиях Донецкого региона применение струговой выемки весьма затруднительно – лишь 127 из имеющихся 1092 шахтопластов являются пригодными к выемке с использованием струговых механизированных комплексов [1,2]. Преимущественное применение имеют очистные комбайны в составе механизированных комплексов.

Наиболее распространены очистные комбайны со шнековыми исполнительными органами вследствие простоты их конструкции, низкой энергоемкости, высокой надежности и сортности разрушаемого угля, а также приспособленности к эффективной обработке границы «уголь – боковые породы».

В то же время функционирование очистных комбайнов в сложных условиях тонких и весьма тонких пологонаклонных пластов существенно затрудняется недостаточной погрузочной способностью шнековых исполнительных органов малого диаметра, работающих в режимах близких к заштыбовке. Это определяет высокую энергоемкость рабочего процесса [3,4], ограниченную диапазоном 2…5 м/мин рабочую скорость перемещения и, как следствие, низкую техническую производительность комбайна.

Поэтому весьма перспективным направлением интенсификации добычи угля из тонких и весьма тонких пологонаклонных пластов представляется повышение эффективности шнековых исполнительных органов очистных комбайнов как средства погрузки разрушенного угля. Важным этапом решения этой задачи является установление влияния основных режимных параметров шнековых очистных комбайнов, в частности скорости перемещения, на их погрузочную способность.

Анализ последних исследований и публикаций

Корректное установление влияния скорости перемещения очистных комбайнов на погрузоч-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

ную способность их шнековых исполнительных органов, как правило, выполняется на основе экспериментальных исследований, проведенных в представительных условиях эксплуатации комбайнов с использованием натурных образцов шнеков [3…11].

Методические подходы, изложенные в [3,4], предусматривают необходимость проведения сложных тензометрических исследований в приближенных к натурным условиям.

В [5,6] рассмотрено влияние ширины захвата шнека на погрузку. Установлено, что увеличением ширины захвата возрастает энергоемкость процесса погрузки.

В [7] выполнен анализ влияния процесса циркуляции выгружаемого угля на критическую по фактору погрузочной способности скорость перемещения комбайна также на основе громоздких экспериментальных исследований.

В [8] рассмотрено влияние на процесс циркуляции угля некоторых конструктивных и режимных параметров шнековых очистных комбайнов на основе экспериментальных исследований, выполненных на модельном стенде, поэтому полученные результаты могут рассматриваться только как оценочные.

В [9] приводятся усредненные значения циркулирующего угля, основанные на результатах натурных экспериментальных исследований. При этом рассматриваемая схема заполнения рабочего пространства шнека разрушенным углем имеет место только при не характерных для реальных условий неинтенсивных режимах работы очистного комбайна.

В [10] представлена математическая модель процесса погрузки разрушенного угля и установлены критические по заштыбовке шнеков значения скоростей перемещения комбайна, однако влияние циркуляции угля на рабочий процесс шнековых исполнительных органов в необходимой мере не учитывается.

При этом в [11] показано, что циркуляция разрушенного угля в рабочем пространстве шнека оказывает определяющее влияние на рабочий процесс шнековых исполнительных органов очистных комбайнов, поэтому при корректной постановке и рассмотрении проблемы ее влиянием нельзя пренебрегать.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является корректное, для решения с достаточной степенью точности современных задач проектирования очистных комбайнов нового технического уровня, установление зависимости погрузочной способности шнековых исполнительных органов комбайнов от их режимных параметров на основе модельных и натурных экспериментов.

Основной материал исследования

Объектом исследований в настоящей работе являются очистные комбайны УКД400 и УКД200-500, являющиеся характерными представителями очистной техники нового технического уровня.

Указанные машины имеют аналогичную компоновочную схему, но некоторые различия (табл. 1) в значениях параметров, определяющих погрузочную способность очистного комбайна: ширина захвата; расстояние между лопастями шнека; угол наклона лопасти шнека; радиус рукояти качалки редуктора резания в зоне разгрузочного торца; высота вынесенного на забой корпуса редуктора; высота рештака конвейера; расстояние от разгрузочного торца шнека до полки рештака забойного конвейера и др.

В качестве основы для решения поставленной задачи использована математическая модель [12], позволяющая имитировать процессы разрушения и погрузки разрушенной горной массы на рештачный став забойного конвейера шнековым исполнительным органом очистного комбайна, работающего в условиях тонких и весьма тонких пологонаклонных пластов. Разработанная модель в существенной мере учитывает характерные особенности рабочего процесса рассматриваемого объекта исследований – циркуляцию угля в шнеке, формирование объемного напряженного состояния и другие специфические особенности процесса погрузки шнеками малого диаметра.

Основными исходными данными для реализации математической модели являются геометрические и режимные параметры очистного комбайна (табл. 1), геометрические параметры рештачного става конвейера (элемента механизированного комплекса) и др.

Основными выходными параметрами математической модели являются: объем (в единицу времени) угля, разрушенного опережающим шнеком V_y; объем (в единицу времени) угля, выгруженного шнеком $V_в$; объем (в единицу времени) угля, оставшегося на почве пласта $V_{о.п.}$; объем (в единицу времени) угля, переброшенного лопастью шнека на его нерабочую сторону $V_{пер}$; объем (в единицу времени) угля, расположенного в зазорах между корпусом комбайна, почвой и стенкой очистного забоя $V_{заз}$; объем (в единицу времени) угля, циркулирующего в рабочем пространстве шнека $V_{цир}$; мощность на погрузку угля шнеком $P_{пог}$.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Табл. 1. Технические характеристики очистных комбайнов УКД400 и УКД200-500

Параметры	Очистной комбайн	
	УКД400	УКД200-500
Параметры исполнительного органа		
Диаметр шнека по резцам D_{uo}, м	0,9	
Диаметр ступицы шнека $d_{ст}$, м	0,385	
Ширина захвата шнека B_3, м	0,715	0,810
Радиальный вылет резца l_p, м	0,072	
Расстояние между лопастями шнека $t_л$, м	0,245	0,215
Угол наклона лопасти по ступице шнека $\alpha_{ст}$, град.	15,85	13,90
Число заходов шнека $N_{зах}$	2	
Параметры корпуса редуктора резания		
Радиус рукояти качалки редуктора резания в зоне разгрузочного торца $R_к$, м	0,220	0,255
Высота вынесенного на забой корпуса редуктора $h_к$, м	0,500	0,515
Параметры рештачного става забойного конвейера и его увязки с очистным комбайном		
Высота рештака конвейера $H_к$, м	0,23	
Расстояние от разгрузочного торца шнека до полки рештака забойного конвейера $L_{тр}$, м	0,582	0,416
Режимные параметры		
Частота вращения шнека $n_{об}$, об/мин	78	79
Скорость подачи комбайна $V_п$, м/мин	1…8	

Значения этих параметров определялись по зависимостям:

$$V_у = V_п \cdot D_{uo} \cdot B_з \cdot \rho \text{ , м}^3\text{/мин},$$

$$V_в = F_{ок.\max} \cdot V_{о.у.} \cdot N_{зах}\text{, м}^3\text{/мин},$$

$$V_{пер} = V_у - V_{о.п.} - V_в\text{, м}^3\text{/мин},$$

$$V_{о.п.} = 0{,}3 \cdot l_р \cdot B_з \cdot V_п + V_{пер}\text{, м}^3\text{/мин},$$

$$V_{заз} = F_{заз} \cdot V_п\text{, м}^3\text{/мин},$$

$$V_{цир} = V_{о.п.} - V_{заз}\text{, м}^3\text{/мин},$$

$$P_{пог} = M_с \cdot (\pi \cdot n_{об}) \cdot 30^{-1}\text{, кВт},$$

где ρ – коэффициент разрыхления угля; $F_{ок.\max}$ – максимальная площадь окна выгрузки, м^2; $V_{о.у.}$ – осевая скорость движения угля, м/мин; $M_с$ – вращающий момент на валу шнека, обусловленный рабочим процессом погрузки разрушенного угля, кН·м; $F_{заз}$ – площадь зазоров, м^2.

Для подтверждения адекватности рассматриваемой математической модели (по мощности погрузки разрушенной горной массы $P_{пог}$) были использованы результаты экспериментальных исследований работы очистных комбайнов УКД400 (в условиях 77-й западной лавы, k^1_5 пласта ОП «Шахта «Красный партизан» ГП «Свердловантрацит») и УКД200-500 (в условиях 524-й лавы, пласта $C^в_5$ ш. «Терновская») [5,6,14]. Результаты экспериментальных и модельных (в соответствующих режимах) исследований приведены в табл. 2. Из сравнения данных модельных и экспериментальных исследований следует, что расхождение значений мощности погрузки $P_{пог}$ не превышает 17 %.

Проверка адекватности математической модели по объему циркулирующего угля [11] показала, что расхождение результатов модельного и натурного экспериментов не превышает 10 %.

Табл. 2. Результаты модельных и экспериментальных исследований работы очистных комбайнов УКД400 и УКД200-500

№ п/п	УКД400				УКД200-500			
	$V_п$, м/мин	$P_{пог}$, кВт		$\lvert\Delta\rvert$, %	$V_п$, м/мин	$P_{пог}$, кВт		$\lvert\Delta\rvert$, %
		модель	эксперимент			модель	эксперимент	
1	3,75	13	12	8,33	4,00	23	21	9,52
2	4,50	17	16	6,25	4,20	25	22	13,64
3	5,30	26	26	0	4,40	28	24	16,67
4	-	-	-	-	6,40	63	66	4,54

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Из приведенных данных следует, что рассматриваемая математическая модель [12] отвечает требованиям адекватности и может быть использована для установления закономерностей исследуемых процессов функционирования очистных машин. Особенности компоновочной схемы очистных комбайнов со шнековым исполнительным органом для тонких и весьма тонких пологонаклонных пластов предопределяют технологическую схему, при которой опережающий шнек разрушает пачку угля, находящуюся у почвы пласта, и осуществляет погрузку разрушенной при этом горной массы. Отстающий шнек разрушает только остающуюся у кровли пласта пачку угля небольшой мощности, а погрузку угля практически не осуществляет.

Поскольку в этом случае опережающий шнек осуществляет основные технологические функции, то, естественно, эффективность функционирования комбайна в целом определяется в первую очередь эффективностью рабочего процесса опережающего исполнительного органа. Соответственно, опережающий шнек является наиболее нагруженным и представляет основной интерес для установления закономерностей функционирования.

На рис. 1 приведена модельная, согласно [12], реализация рабочего процесса очистного комбайна, работающего в условиях тонких и весьма тонких пологонаклонных пластов, – графическое представление процесса погрузки разрушенного угля опережающим исполнительным органом очистных комбайнов УКД400 и УКД200-500, а также мощность погрузки.

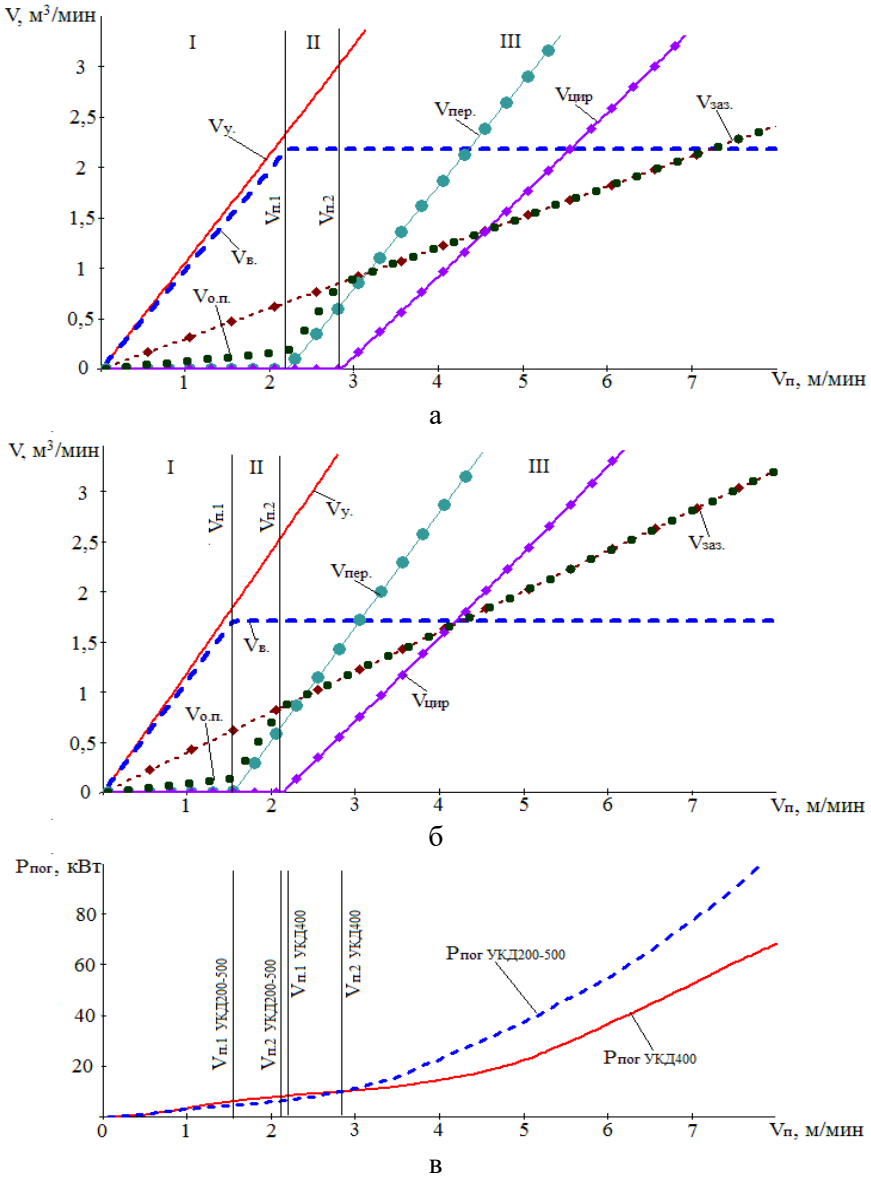


Рис. 1. Результаты модельного эксперимента:
а – графическое представление процесса погрузки для очистного комбайна УКД400;
б – графическое представление процесса погрузки для очистного комбайна УКД200-500;
в – мощность процесса погрузки очистных комбайнов УКД400 и УКД200-500

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Анализ результатов модельного эксперимента позволил выделить три характерные зоны в возможном диапазоне изменения скорости перемещения очистного комбайна.

Зона I (см. рис. 1) характеризуется высокой эффективностью процесса погрузки разрушенного угля шнековым исполнительным органом очистного комбайна (зона режимов работы, при которых производительность комбайна не ограничивается погрузочной способностью его исполнительных органов). В этом случае $V_y - V_{o.n.} = V_в$.

Окно выгрузки не ограничивает скорость перемещения потока выгружаемого угля, поэтому циркуляция угля внутри шнека отсутствует.

На почве пласта остается слой не погруженного угля $V_{o.n.}$, частично заполняющий зазоры между корпусом комбайна и почвой пласта. Высота не погруженного слоя составляет примерно треть радиального вылета резца [14]. Процесс погрузки осуществляется при небольшом значении давления перемещаемого разрушенного угля на лопасти шнека, что обуславливает линейный характер зависимости изменения мощности погрузки как функции перемещения комбайна.

Для очистных комбайнов УКД400 и УКД200-500 значение мощности погрузки опережающим шнеком в первой зоне не превышает 9 кВт и 5 кВт соответственно. Граничные значения скорости перемещения $V_{n.1}$, соответствующие режиму работы без ограничения производительности комбайна по фактору недостаточной погрузочной способности, можно определить из условия $V_y - V_{o.n.} = V_в$.

Зона I для очистных комбайнов УКД400 и УКД200-500 находится в пределах значений скорости перемещения $V_{n.1}$ до 2,6 м/мин и до 1,5 м/мин соответственно. Смещение границы зоны $V_{n.1}$ для комбайна УКД200-500 в сторону меньших значений обусловлено более высокой его производительностью по разрушению пласта вследствие большей ширины захвата шнека, а также вследствие меньшей площади окна выгрузки.

На рис. 2 представлен график изменения соотношения основных параметров, характеризующих эффективность процесса погрузки разрушенного угля опережающим шнековым исполнительным органом очистного комбайна УКД400 как функции его перемещения.

Из анализа приведенных на рис. 2 зависимостей следует, что погрузочная способность (отношение выгруженного объема угля к объему разрушенного шнеком угля $V_в/V_y$) опережающего шнека очистного комбайна УКД400 в зоне I является постоянной величиной, значение которой составляет 0,93.

Значение $V_{o.n.}/V_y$ (соотношение объема оставшегося на почве пласта не погруженного, расположенного в зазорах угля и объема разрушенного опережающим шнеком угля) составляет 0,07.

Зона II (см. рис. 1) характеризуется ограниченной эффективностью процесса погрузки разрушенного угля шнековым исполнительным органом очистного комбайна (однако погрузочная способность такого уровня еще не ограничивает производительность комбайна).

Ограниченная эффективность процесса погрузки разрушенного угля в этой зоне обусловлена, в первую очередь, малыми значениями площади окна выгрузки шнека.

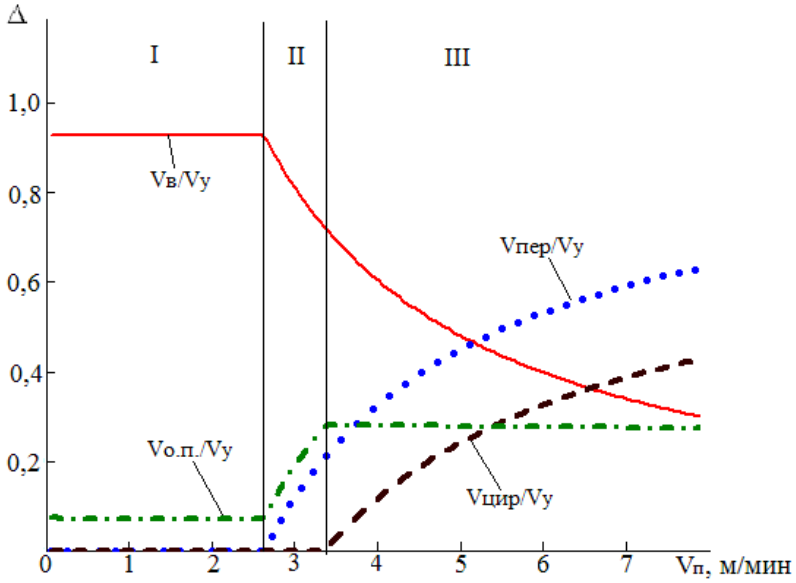


Рис. 2. К анализу эффективности процесса погрузки разрушенного угля опережающим шнековым исполнительным органом комбайна УКД400

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Объем разрушенного, но не выгруженного из рабочего пространства шнека угля можно определить из выражения:

$$V_{пер} = V_{у} - V_{о.п.} - V_{в}.$$

Этот объем перебрасывается лопастью шнека на ее нерабочую сторону и добавляется к объему угля, оставшегося на почве пласта в предыдущем цикле выгрузки.

При выполнении условия $V_{о.п.} \le V_{заз}$ весь объем не погруженного угля размещается в зазорах между корпусом комбайна, почвой и грудью очистного забоя. Циркуляция угля в рабочем пространстве шнека при работе очистного комбайна в этой зоне отсутствует [4].

Процесс погрузки в зоне II осуществляется также при относительно невысоком значении давления перемещаемого разрушенного угля на лопасти шнека, что обуславливает сохранение линейного характера зависимости изменения мощности на погрузку как функции перемещения комбайна.

Для очистных комбайнов УКД400 и УКД200-500 значение мощности погрузки опережающим шнеком во второй зоне изменяется от 9 кВт до 11 кВт и от 5 кВт до 6 кВт соответственно.

Максимальную скорость перемещения $V_{п.2}$, соответствующую работе очистного комбайна во второй зоне, можно определить из условия: $V_{о.п.} = V_{заз}$. Зона II для очистных комбайнов УКД400 и УКД200-500 находится в пределах значений скорости перемещения $V_{п.2}$ от 2,6 м/мин до 3,3 м/мин и от 1,5 м/мин до 2,1 м/мин соответственно. Смещение границы зоны II для комбайна УКД200-500 в сторону меньших значений скорости перемещения $V_{п.2}$ обусловлено соответствующими значениями ширины захвата шнека и геометрических параметров вынесенного на забойную часть корпуса редуктора резания (т.е. значениями площади зазоров между корпусом комбайна, почвой и грудью очистного забоя).

Работа очистного комбайна во второй зоне (см. рис. 2) характеризуется снижением значения погрузочной способности шнека ($V_в/V_у$) с 0,93 до 0,72. Объем угля, остающийся на почве ($V_{о.п.}/V_у$), во второй зоне соответственно возрастает с 0,07 до 0,28 (разность 0,21 соответствует объему перебрасываемого лопастью шнека угля).

Зона III (см. рис. 1) характеризуется недостаточной эффективностью процесса погрузки разрушенного угля шнековым исполнительным органом очистного комбайна, обусловливающей ограничение производительности комбайна по фактору недостаточной погрузочной способности.

Рабочий процесс в третьей зоне сопровождается циркуляцией угля в рабочем пространстве шнека [4,13]. Циркуляция имеет место в случае, если $V_{о.п.} > V_{заз}$, то есть когда объем не погруженного шнеком угля возрастает настолько, что он уже не может быть размещен в зазорах между корпусом комбайна, почвой паста и грудью забоя.

Циркулирующий уголь снижает рабочий объем шнека [11], что сопровождается интенсивным возрастанием напряженного состояния угля в рабочем пространстве шнека. Следствием этих процессов является значительное дополнительное измельчение угля и нелинейный характер зависимости [15] изменения мощности на погрузку как функции скорости перемещения комбайна вида (см. рис. 1в):

$$P_{пог} = k_1 \cdot B_з \cdot e^{k_2 \cdot B_з \cdot V_п}, \text{ кВт},$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты уравнения регрессии, полученные экспериментально.

Так, например, при возрастании скорости перемещения очистного комбайна УКД200-500 от $V_{п.2}$ (2,1 м/мин) до 5 м/мин (в 2,4 раза) мощность погрузки опережающим шнеком увеличивается от 6 кВт до 37 кВт (более чем в 6 раз).

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что процесс циркуляции угля в опережающем шнеке очистных комбайнов УКД400 и УКД200-500 начинается уже при малых значениях скорости перемещения 2,8 м/мин и 2,1 м/мин соответственно. Поэтому погрузочная способность шнекового исполнительного органа (см. рис. 2) при дальнейшем возрастании скорости перемещения (начиная с указанных значений) значительно снижается (по сравнению со значением 0,72 во второй зоне) и составляет только 0,48 для комбайна УКД400 при скорости перемещения 5 м/мин.

Отношение объема угля, остающегося на почве пласта, к объему угля, разрушенного опережающим шнеком ($V_{о.п.}/V_у$), в рассматриваемой (третьей) зоне возможных значений скорости перемещения комбайна является константой и составляет $V_{о.п.}/V_у$=0,28.

Соответственно, $V_{пер}/V_у$=0,52. При этом $V_{цир}/V_у$=0,24 определяется циркуляцией угля в шнеке, а $V_{заз}/V_у$=0,28 соответствует объему угля, расположенного в зазорах между корпусом комбайна, почвой и грудью очистного забоя.

По мере возрастания скорости перемещения комбайна более 5 м/мин объем разрушаемого угля линейно возрастает, а объем выгружаемого, циркулирующего и размещающегося в зазорах между корпусом комбайна, почвой паста и грудью забоя угля остается постоянным. При неко-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

тором значении скорости перемещения комбайна значения этих объемов выравниваются, а при дальнейшем увеличении скорости перемещения объем разрушаемого угля начинает превышать объем выгружаемого, циркулирующего и размещающегося в зазорах угля. Далее следует уплотнение разрушенного и находящегося в шнеке и околошнековом пространстве угля (заштыбовка), сопровождающееся нелинейным возрастанием сил трения и соответствующего существенного возрастания мощности процесса выгрузки как функции скорости перемещения комбайна. Этот процесс развивается до момента опрокидывания приводного электродвигателя вследствие исчерпания запаса его мощности.

Следует отметить, что в зоне III выход на режим заштыбовки происходит очень быстро, что практически не позволяет даже кратковременную эксплуатацию комбайна в интенсивных режимах.

Из анализа графиков зависимости времени заполнения $t_{зап}$ (с учетом циркулирующего угля) рабочего пространства опережающих шнеков очистных комбайнов УКД400 и УКД200-500 (рис. 3) как функции скорости перемещения следует, что с увеличением скорости перемещения время заполнения рабочего пространства шнека циркулирующим углем убывает нелинейно. Так, для комбайна УКД400 время полного заполнения рабочего объема шнека циркулирующим углем находится в пределах от 3,24 до 0,12 мин, а для УКД200-500 – в пределах от 2,19 до 0,1. Т.е. при $V_n > V_{n.2}$ время полного заполнения рабочего пространства шнека соответствует всего 10…15 оборотам шнека.

Выводы

На основе сравнения данных модельных и экспериментальных в реальных условиях работы комбайна исследований установлена адекватность разработанной математической модели процесса погрузки шнековым исполнительным органом по критериям мощности погрузки и объема циркулирующего угля. Расхождение значений мощности погрузки угля не превышает 17 %, а значений объема циркулирующего угля – 10 %.

Установлено, что погрузочная способность шнековых исполнительных органов в существенной мере зависит от скорости перемещения очистных комбайнов. При этом целесообразно выделить три характерные зоны работы очистных комбайнов в пределах возможного диапазона их перемещения:

– первая зона соответствует диапазону значений скорости перемещения, при которых производительность комбайна не ограничивается погрузочной способностью его исполнительных органов. На почве пласта при этом остается небольшой слой не погруженного угля, который только частично заполняет зазоры между корпусом комбайна и почвой пласта;

– вторая зона соответствует диапазону значений скорости перемещения, при которых производительность комбайна также еще не ограничивается погрузочной способностью его исполнительных органов, однако объем не погруженного угля полностью заполняет зазоры между корпусом комбайна, почвой и грудью очистного забоя. Значительный объем не погруженного угля в значительной мере снижает эффективность процесса погрузки разрушенного угля;

– третья зона соответствует диапазону значений скорости перемещения, при которых производительность комбайна существенно ограничивается недостаточной погрузочной способностью его исполнительных органов.

Процесс погрузки сопровождается циркуляцией и интенсивным возрастанием напряженного состояния угля в рабочем пространстве шнека, следствием чего является значительное дополнительное измельчение угля и увеличение мощности погрузки как функции скорости перемещения комбайна.

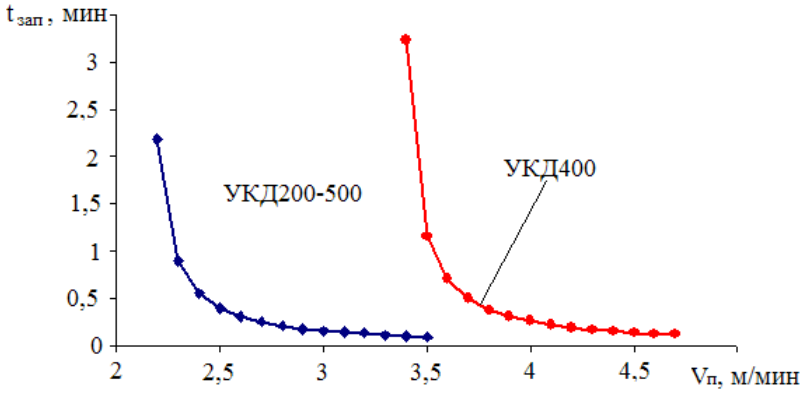


Рис. 3. График зависимости времени заполнения рабочего объема опережающего шнека комбайнов УКД400 и УКД200-500 как функция скорости перемещения

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Процесс погрузки сопровождается циркуляцией и интенсивным возрастанием напряженного состояния угля в рабочем пространстве шнека, следствием чего является значительное дополнительное измельчение угля и увеличение мощности погрузки как функции скорости перемещения комбайна.

Определение рациональных, по критерию максимальной технической производительности, значений скорости перемещения шнековых очистных комбайнов должно производиться с учетом характера и особенностей рабочего процесса погрузки угля их шнековыми исполнительными органами. При этом характер и особенности рабочего процесса погрузки в существенной мере определяются не только значениями геометрических параметров шнековых исполнительных органов, но и диапазоном значений (зоной) возможной скорости перемещения машины.

Список литературы

1. Горные машины для подземной добычи угля: учебное пособие для вузов / П.А. Горбатов и др. – Донецк: Норд-Компьютер, 2006. – 669 с.
2. Гуляев, В.Г. Актуальность и проблемы создания автоматизированных струговых комплексов для безлюдной выемки пологих тонких угольных пластов Донецкого бассейна // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2016. – №6. – С. 24-34.
3. Нечепаев, В.Г. Механо-гидравлические шнековые системы выгрузки и транспортирования. – Донецк: ДонНТУ, 2005. – 215 с.
4. Бойко, Н.Г. Очистные комбайны для тонких пластов. – Донецк: ДонНТУ, 2010. – 476 с.
5. Шабаев, О.Е. Методика определения оптимальной ширины захвата шнекового исполнительного органа очистных комбайнов / О.Е. Шабаев, В.Г. Нечепаев, П.П. Зинченко // Сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века», 10-16 сентября 2018 г., г. Севастополь. – Донецк: ДонНТУ. – Т.2. – С. 237-243.
6. Шабаев, О.Е. Обоснование параметров шнекового исполнительного органа очистных комбайнов для тонких пластов / О.Е. Шабаев [и др.] // Седьмая Всероссийская научно-практическая конференция «Системы управления электротехническими объектами» 11-12 декабря, г. Тула.– Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. – С. 83-88.
7. Миничев, В.И. Угледобывающие комбайны. – М.: Машиностроение, 1976. – 248 с.
8. Кальманович, З.З. Исследование транспортирующей способности шнековых исполнительных органов угольных комбайнов (на примере комбайнов 1К-101 и 2К-52): автореф. дис…. канд. техн. наук: 172 / Кальманович, З.З. – Москва, 1968. – 20 с.
9. Тарасевич, В.И. Циркуляция и коэффициент циркуляции угля для шнеков малого диаметра / В.И. Тарасевич, А.В. Тарасевич // Научные труды Донецкого национального технического университета. – Донецк: ДонНТУ, 2006. – Вып.12. – С. 264-275.
10. Ткачев, В.В. Использование имитационного моделирования для исследования системы автоматического управления добычным комбайном / В.В. Ткачев, А.В. Бубликов.– Днепропетровск: НГУ, 2015. – 182 с.
11. Шабаев, О.Е. Анализ процесса циркуляции угля в шнеках очистных комбайнов для тонких пологонаклонных пластов / О.Е. Шабаев, В.Г. Нечепаев, П.П. Зинченко // Материалы 5-й Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса», 21-23 мая, г. Донецк. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – Т.3. – С. 138-142.
12. Шабаев, О.Е. Имитационная модель функционирования шнековых очистных комбайнов, предназначенных для выемки тонких пологонаклонных пластов / О.Е. Шабаев, Е.Ю. Степаненко, П.П. Зинченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: сб. научн. тр. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – № 2(65). Т.2. – С. 26-34.
13. Шабаев, О.Е. Экспериментальные исследования влияния ширины захвата шнекового исполнительного органа комбайна на эффективность процесса погрузки / О.Е. Шабаев, П.П. Зинченко, А.В. Мезников // Горные науки и технологии. – 2019. – №2. – С. 90-103.
14. Тарасевич, В.И. Влияние резцов шнекового исполнительного органа на выгрузку угля из рабочего пространства шнека / В.И. Тарасевич, А.В. Тарасевич // Научные труды Донецкого национального технического университета (сер. горно-электромеханическая). – Донецк: ДонНТУ, 2005. – Вып.94. – С. 210-217.
15. Нечепаев, В.Г. Исследование и определение параметров шнеков с переменным шагом очистных комбайнов для тонких пластов с целью повышения их погрузочной способности: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.05.06 / Нечепаев Валерий Георгиевич. – Донецк, 1982. – 17 с.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

O.E. Shabaev /Dr. Sci. (Eng.)/, V.G. Nechepaev /Dr. Sci. (Eng.)/, E.U. Stepanenko /Cand. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)
P.P. Zinchenko
DonNTU Institute of Mining and Geology (Donetsk)

DETERMINATION OF LOADING CAPACITY DEPENDENCE OF AUGER CUTTER-LOADERS ON THEIR OPERATING PARAMETERS BASED ON MODEL AND FULL-SCALE EXPERIMENTS

Background. *When designing cutter-loaders capable of working effectively in thin flat layers at intensive coal mining, it is necessary to consider the influence of operating parameters of the machine on the loading capacity of auger working bodies.*
Materials and/or methods. *An adequate mathematical model used to solve this problem allows simulating the processes of destruction and loading of rock mass on the f conveyor by the screw of a cutter-loader working in thin sloping layers.*
Results. *Determined that the loading capacity of the auger working bodies significantly depends on the speed of the cutter-loader movement. Thus, it is expedient to allocate three special zones. The first zone corresponds to the range of values of movement speed, at which the productivity of the cutter-loader not limited to the loading capacity of the augers. The second zone corresponds to the range of values of movement speed at which the performance of the cutter-loader is not limited to the loading capacity of its working bodies. However, the volume of half-loaded coal fills the gaps between the housing of the cutter-loader, soil, and stope face. The third zone is a range of values of movement speed at which cutter-loader performance mostly limited by insufficient loading capacity of its working bodies. The loading process accompanied by circulation and an intensive increase in the stress state of coal in the working space of the auger, which results in a significant additional grinding of coal and an increase in the loading capacity as a function of the cutter-loader movement speed.*
Conclusion. *The definition of the rational, according to the criterion of maximum technical performance, values of auger cutter-loaders movement speed should be made taking into account the nature and features of the working process of loading coal by their auger working bodies. The quality and characteristics of the workflow of loading to a significant extent determined not only by the values of geometrical parameters of screw working bodies but with a range (zone) of the possible movement speed of the machine.*

Keywords: *cutter-loader, auger working body, loading capacity, coal unloading process, coal circulation, loading efficiency, bearing capacity.*

Сведения об авторах

О.Е. Шабаев
SPIN-код: 1447-2343
ORCID iD: 0000-0002-0845-7449
Телефон: +380 (95) 429-13-32
Эл. почта: oeshabaev@ya.ru

Е.Ю. Степаненко
ORCID iD: 0000-0002-8789-307X
Телефон: +380 (71) 337-94-31
Эл. почта: gm@donntu.org

В.Г. Нечепаев
ORCID iD: 0000-0003-4016-1661
Телефон: +380 (71) 391-12-64
Эл. почта: nechepayev@mech.donntu.org

П.П. Зинченко
SPIN-код: 4710-7409
ORCID iD: 0000-0002-4070-2715
Телефон: +380 (66) 427-45-36
Эл. почта: pawel.zin4encko@yandex.ru

Статья поступила 03.06.2019 г.
© О.Е. Шабаев, В.Г. Нечепаев, Е.Ю. Степаненко, П.П. Зинченко, 2019
Рецензент д.т.н., проф. В.Г. Гуляев

УДК 622.647.1

А.М. Брюханов /д.т.н./, О.А. Демченко /к.т.н./, Л.А. Муфель /к.т.н./
ГУ «Макеевский государственный научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности» (Макеевка)
К.Н. Маренич /д.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ЛОКАЛЬНЫЕ ЗАЗЕМЛЯЮЩИЕ СЕТИ – НОВОЕ РЕШЕНИЕ В ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ ПОДЗЕМНОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

На основании анализа схемы и функционирования общешахтной заземляющей сети в составе подземных высоковольтных сетей выявлены условия возникновения потенциально опасных состояний, вызванных электропоражением и появлением открытого искрообразования. Обоснованы применение локальных заземляющих сетей и структура технических средств, ограничивающих емкостную проводимость между фазами сети и контуром «земля».

Ключевые слова: *система, местное заземление, локальная заземляющая сеть, общешахтная заземляющая сеть, ток утечки на землю, емкость электрической сети, кабель, конструкция.*

Постановка проблемы

Применение защитного заземления корпусов электроустановок как важнейшего компонента системы безопасности эксплуатации в полной мере получило распространение на шахтные высоковольтные сети и является общепринятым техническим решением в области защиты от электропоражения в случае появления контакта фазного проводника с металлическим корпусом электроутсановки, нормально не находящимся под напряжением [1]. Действующий ГОСТ 28298 «Заземление шахтного электрооборудования. Технические требования и методы контроля» [2] определяют структуру общешахтной заземляющей сети (ОЗС) как «совокупность главных и местных заземлителей и соединяющих их заземляющих проводников, предназначенных для защиты человека от поражения электрическим током заземлением».

Наряду с обеспечением защиты человека от электропоражения при касании к корпусу электрооборудования, который может оказаться под напряжением, концепция обустройства и эксплуатации ОЗС предопределила и ряд потенциально опасных состояний. В частности, это относится к контуру заземляющей цепи, имеющему электрическую связь с трехпроводной трехфазной сетью, что приводит к перемещению токов утечки из силовой сети в контур «земля» под действием активной и емкостной проводимостей. Токи утечки также протекают в контуре «земля» – ОЗС при разряде емкости силовых кабелей после их отключения; работе устройств защиты от перенапряжений; компенсации емкости в распределительной высоковольтной сети. Величина тока утечки на землю определяется активным и емкостным сопротивлением (между контуром «земля» и фазами сети) и с учетом тенденции применения разветвленных и протяженных электрических сетей, в т.ч. кабельных линий, имеет тенденцию к увеличению.

В настоящее время токи утечки, протекающие по заземляющей сети, имеют искроопасные параметры [3,4], что нарушает положения Правил безопасности [5]. Кроме этого, к проблемным вопросам эксплуатации ОЗС можно отнести:

– однофазное замыкание на корпус (жилу заземления) или двухфазное замыкание в трехфазной сети в одном месте, посредством ОЗС происходит вынос опасных потенциалов на оболочки всего электрооборудования в шахте, создавая незащищенные участки контура заземления в выработках;

– короткие замыкания в трехфазной сети происходят с участием жилы заземления (контура «земля»). В результате такого повреждения по ОЗС протекает искроопасный ток, превышающий сотни ампер. В случае нарушения ОЗС возникает потенциальная опасность взрыва метановоздушной смеси, пожара в шахте, создаются условия для электропоражения;

– ОЗС, выполняя гальваническое соединение корпусов всего электрооборудования в шахте и металлического оборудования (в выработках), имеющего контакт с контуром «земля», способствует увеличению емкости сети. Эта емкость сети, помимо питающих кабелей, определяется

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

емкостью коммутационной аппаратуры, электродвигателей и металлического оборудования, соединенного с местными заземлителями. При этом разветвленная высоковольтная система электроснабжения с питанием от одного источника с помощью ОЗС значительно увеличивает емкость сети в каждом направлении питания;

– параметры и непрерывность цепи местного заземления не контролируются, что не гарантирует соблюдения требуемых защитных параметров контура ОЗС;

– заземление экранов основных жил вызывает увеличение емкости в экранированных кабелях в сравнении с неэкранированными. Контакт индивидуальных экранов на основе медной фольги с изоляцией основных жил сокращает расстояние между ними, что ведет к увеличению емкости контура «медный провод, изоляция, фольга». Соединение экрана с заземляющей сетью, содержащей корпуса различного оборудования, также увеличивает емкость сети.

Таким образом, ОЗС способствует формированию емкости в силовых кабелях и, следовательно, увеличивает емкостные утечки тока на землю, что существенно повышает риск электротравматизма. В еще большей степени это относится к электросетям с большим количеством силовых присоединений, т.к. в этом случае ОЗС (включая местные заземлители) соединена с корпусами электрооборудования параллельно, что увеличивает емкость сети. Существующие защиты от электропоражения не устраняют опасности, а лишь сокращают продолжительность опасного состояния [4,6].

Из изложенного следует, что формирование сценариев опасных событий в большинстве случаев обусловлено общей сетью заземления. Опасности, формируемые ОЗС, достаточно значимы и очевидны. В широком спектре опасных событий, состояний при эксплуатации шахтных электрических сетей действие ОЗС должно рассматриваться как причина аварий, фактор несоответствия регламентированным требованиям Правил безопасности. Этим обусловлена актуальность изменения сложившихся традиций и представлений при разработке технических мер, направленных на обеспечение взрыво- и электробезопасности в шахтах.

Анализ последних исследований и публикаций

Снижение емкости шахтной электросети известными научными обоснованиями и техническими решениями осуществляется в основном в двух направлениях [7]. Во-первых, шахтная высоковольтная электрическая сеть, учитывая общую тенденцию к увеличению количества электропотребителей, в т.ч. размещенных на дальних расстояниях от главной поверхностной подстанции шахты, в настоящее время выполняется двумя, гальванически не связанными между собой компонентами: высоковольтной электросетью потребителей поверхности и высоковольтной электросетью подземных потребителей [8]. Это позволяет исключить параллельное присоединение активно-емкостных цепей (между фазами сети и контуром «земля») подземной электросети и электросети поверхности. Однако ОЗС электросети поверхности и ОЗС подземных электроустановок присущи все недостатки концептуальной ОЗС, отмеченные выше.

Вторым направлением повышения безопасности эксплуатации электрической сети является компенсация емкости (путем приближения уровней емкостного и индуктивного токов, протекающих по цепи «трехфазная сеть – ОЗС»). При параллельном подключении индуктивности к контуру емкости достигается резонанс токов, когда индуктивные и емкостные сопротивления равны между собой (по модулю). Однако в этом случае индуктивный ток в общей части сети заземления может достигать 30 А и более при величине фазного напряжения 3400 В. При этом запасенная энергия, пропорциональная емкости сети и квадрату напряжения ($W=CU2/2$), существенно превышает энергию воспламенения метано-воздушной смеси (0,28 мДж).

Изложенное позволяет сделать вывод о том, что формирование сценариев рассмотренных выше опасных событий обусловлено, в частности, общей сетью заземления. Ей присущи такие состояния, как вынос потенциалов общей сетью заземления на корпуса всего электрооборудования по всей шахте, переход тока короткого замыкания в незащищенную заземляющую сеть, воспламенение метано-воздушной смеси токами утечки на землю, включая процессы при компенсации емкости сети. В результате создаются условия, представляющие опасность электропоражения, открытого искро- и дугообразования, интенсивного нагрева корпусов электроустановок. Это требует дальнейших исследований и разработок технических решений в области повышения безопасности эксплуатации рудничного высоковольтного электрооборудования.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящего исследования является обоснование технических решений, позволяющих снизить емкостную проводимость в шахтной высоковольтной сети на основе изменения концепции общешахтной заземляющей сети и

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

применения вместо нее локальных заземляющих сетей, а также разработку высоковоьтных кабелей специальной конструкции.

Основной материал исследования

Рассмотрим процессы в ОЗС и ее защитные свойства на примере модели электрической связи трехфазной цепи с жилой заземления (рис. 1), что соответствует общепринятому способу обустройства шахтной высоковольтной электрической сети. Сопоставим их с вариантом применения локальной сети заземления (на примере структуры местного заземления распределительного пункта участка (рис. 2).

Применительно к схеме (рис. 1), надежность защиты человека от электропоражения повышается с увеличением числа параллельно соединенных заземлителей (существенное снижение сопротивления растеканию тока в контуре «земля»). При этом схема позволяет эффективно выравнивать потенциалы между корпусами электрооборудования за счет присоединения к ним жил заземления, в т.ч. проложенных в кабелях. Применение на шахтах металлокрепи как естественного заземлителя обеспечивает выравнивание потенциалов между стойками крепи, что очень важно для устранения опасности шагового напряжения.

Представляется целесообразным в ходе совершенствования технических решений в области обеспечения электробезопасности эксплуатации систем подземного высоковольтного электроснабжения сохранить и использовать технические решения, обеспечивающие реализацию положительных свойств ОЗС. Этой концепции соответствует предложение о применении вместо ОЗС совокупности локальных заземляющих сетей (ЛЗС, рис. 2), оснащенных дополнительными средствами обеспечения безопасности. Так, впервые предусматривается непрерывный контроль токов утечки в землю и автоматическое отключение ситемы электроснабжения в случае превышения нормируемого значения; снижение аварийного тока утечки через заземляющее устройство посредством локализации утечек активной и емкостной составляющих; деление высоковольтной сети на отдельные самостоятельные участки; устранение токов утечки, возникающих в режиме короткого замыкания в кабеле; гальваническое разделение трехфазной и заземляющей сетей; применение технических мер по ограничению емкости сети, включая использование полимерных материалов, неактивных к формированию емкости; применение защитной изоляции и защитного изолирования, устраняющих утечки тока. Основу ЛЗС составляет заземляющая шина в зоне компактного размещения электрооборудования технологического участка.

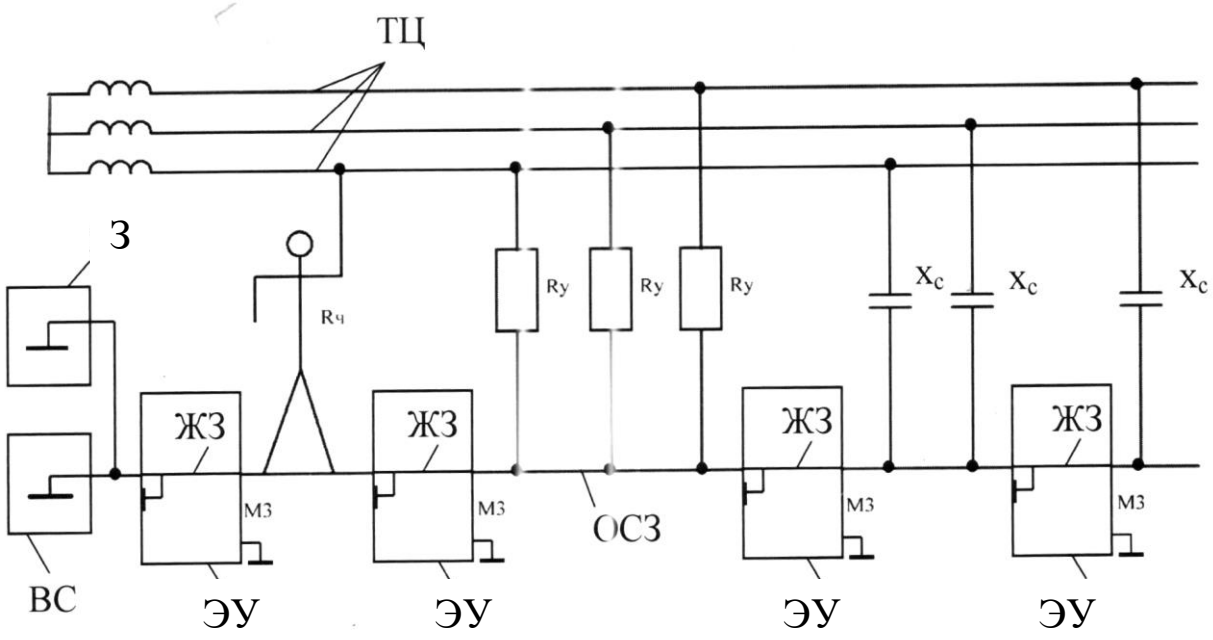


Рис. 1. Модель электрической связи трехфазной цепи с жилой заземления и условия поражения человека электрическим током:
ТЦ – трехфазная цепь; МЗ – местное заземление; ЖЗ – жила заземления; ЭУ – электроустановка; ОСЗ – общешахтная сеть заземления; ВС – водосборник; З – зумпф; $R_ч$ – сопротивление человека; R_y – активное сопротивление изоляции жил кабеля в контуре утечки тока на землю; X_c – емкостное сопротивление в контуре утечки тока на землю

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Ее габаритные размеры (длина l и сечение s) должны быть регламентированы критерием непревышения активным сопротивлением изоляции $R_{из}$ допустимого значения $R_{доп}=\rho l/s$. Применительно к стальному проводнику с удельным сопротивлением $\rho=0{,}1$ Ом мм^2/м (при температуре 20 °С) длина заземляющей шины регламентируется величиной в 21 м при сечении не менее 50 мм^2.

Особенностью предлагаемой системы местного заземления является применение двух устройств МЗ с заземлителями на основе трех рам металлокрепи, устанавливаемых на концевых участках заземляющей шины. Последняя, соединяет параллельно между собой оба устройства МЗ, что позволяет достичь весьма малое сопротивление растеканию и равномерно распределить потенциалы токов утечки по почве выработки. Это позволит локализовать токи утечки на заданном участке, не допуская их протекание по всей шахте (что было свойственно ОЗС). Данное техническое решение, безусловно, предусматривает функционирование в штатном режиме аппаратов защиты от утечек тока на землю и отключение сети при превышении током утечки нормируемого значения (25 mA). В то же время, концепция ЛЗС позволяет существенно снизить величину тока утечки между фазами сети и контуром «земля», что достигается локализацией активной и емкостной составляющих утечек тока; делением высоковольтной сети на самостоятельные участки.

Для снижения тока утечки (между фазами сети и контуром «земля») служит реализация гальванического разделения трехфазной цепи и заземляющей сети. Вследствие исключения ОЗС изменены функциональное назначение и принцип размещения жил в кабеле. В связи с этим концепция конструкции высоковольтного кабеля также претерпевает изменения. Она состоит в следующем:

– в структуру системы электроснабжения и, в частности, в конструкцию кабеля вводится экранная жила, изолированная от корпусов электрооборудования и цепей МЗ, что позволяет обеспечить циркуляцию токов утечки и оперативного тока аппарата защиты от утечек между фазами и экранной жилой (кроме того, применение экранной жилы снижает емкость кабеля ввиду деления ею сети);

– в качестве материала бронированной оболочки кабеля, в т.ч. индивидуальных экранов основных жил, используют полимер, не активный к формированию емкостного эффекта (что еще в большей степени будет способствовать снижению емкости (емкостной проводимости) кабеля;

– заземляющую жилу в кабеле не предусматривают и вместо нее в штреке, в местах размещения распределительного пункта и устройств МЗ, обустраивают ЛЗС.

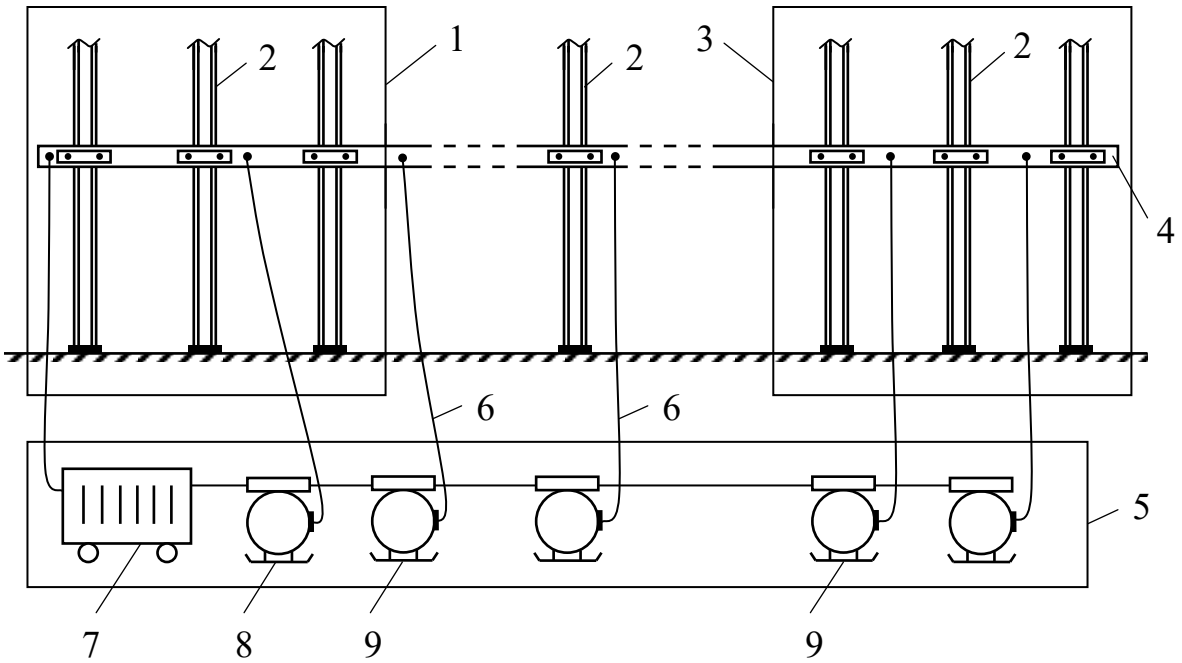


Рис. 2. Локальная сеть заземления в структуре местного заземления распределительного пункта участка:
1, 3 – устройство местного заземления; *2* – рамы металлокрепи; *4* – локальная заземляющая сеть; *5* – распределительный пункт участка; *6* – заземляющие провода; *7* – передвижная трансформаторная подстанция; *8* – фидерный выключатель; *9* – коммутационные аппараты

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Такие технические решения позволят существенно снизить ток утечки через заземляющее устройство; устранить ток утечки, обусловленный возникновением короткого замыкания жил непосредственно в кабеле (что является характерной аварией для систем с применением ОЗС); исключить необходимость применения компенсации емкости, что применительно к высоковольтной шахтной электрической сети характеризуется искроопасными параметрами и высокой стоимостью реализации; устранить условия для образования между человеком и токоведущими частями нежелательных электрических цепей, что способствует повышению электробезопасности работ в шахтах.

Эффективными техническими решениями сдедует считать защитную изоляцию нетоковедущих корпусов и защитное изолирование токоведущих частей в соответствии с требованиями защиты вида «е», что существенно уменьшает утечки тока на землю ввиду устранения условий для замыкания фазы на корпус электрооборудования.

Таким образом, с учетом распределения активного $R_{из}$ и емкостного $X_c=1/2\pi fC$ сопротивлений изоляции ток утечки на землю $I_{ут}$ (т.е. ток через человека $I_{чел}$) в сети фазного напряжения $U_ф$ частоты f определяется формулой:

$$I_{ут} = I_{чел} = \frac{U_Ф}{R_{чел} \cdot \sqrt{1 + \frac{R_{из}(R_{из} + 6R_{чел})}{9R_{чел}^2(1 + R_{из}^2 \omega^2 C^2)}}}, \quad (1)$$

где $\omega=2\pi f$ – угловая частота синусоидального тока.

В сетях линейного напряжения 6 кВ, в случае если емкостное сопротивление значительно ниже активного, ток через человека может быть определен формулой:

$$I_{чел} = \frac{3U_Ф \omega C}{R_{чел} \cdot \sqrt{1 + 9R_{чел}^2 \omega^2 C^2}}. \quad (2)$$

С учетом изложенного, ток утечки, локализованный в кабеле модернизированной конструкции с сечением рабочих жил 3×70 мм^2 и цепи контура «земля» (с сопротивлением растеканию 11,90 Ом – параметр глинистого сланца), составляет 107 мА (расчетное значение), в то время как в высоковольтной электросети шахты токи утечки в контуре «земля» достигают 30 А. Того же порядка результаты расчета применительно к формированию контура «земля» породами «суглинок» и «песчаный сланец» с сопротивлением растеканию, соответственно, 34,01 Ом и 106, 37 Ом.

Сопротивление местного заземления в основном определяется сопротивлением растеканию вмещающих пород в выработках. Установлено, что потенциал и плотности тока уменьшаются по мере удаления от заземлителя, и на некотором расстоянии от него (20 м для одиночного электрода и 7 м для естественного заземлителя на основе трех рам металлокрепи) плотность тока практически можно принять равной нулю.

Как видно, условия для протекания тока утечки относительно заземлителя более благоприятны для ЛЗС с использованием естественного заземлителя. Обусловлено это тем, что в этом случае ток утечки протекает по поверхности почвы (боковых пород) выработки между расположенными рамами крепи. Это определяется относительно малым сопротивлением растеканию и связано с увлажнением почвы, высокой токопроводностью угольной и породной пыли.

Расчеты параметров электробезопасности в электросети с применением ЛСЗ и вышеуказанными параметрами модернизированного кабеля и местного заземления показали, что ток через тело человека (расчетное значение) составляет 0,00208 А, напряжение прикосновения – 1,25 В. Эти данные значительно ниже нормируемых значений названных величин, которые, соответственно, равны: 6 мА при длительно допустимом токе через тело человека и 36 В при воздействии тока свыше 1 с. Результаты реасчетов показывают, что сопротивление растеканию, равное 11,90 Ом, принято с достаточно высокими запасами. Полученные результаты относятся к одному устройству МЗ, тогда как в локальной системе заземления предусмотрено два, причем включенных параллельно. Таким образом, приведенные результаты характеризуют достаточно высокие защитные свойства локальной заземляющей сети усовершенствованной структуры.

Шаговое напряжение в зоне размещения двух МЗ также не представляет опасности для человека, поскольку разность потенциалов по почве выработки практически равна нулю. Последнее обусловлено выравниванием потенциалов вследствие шунтирующего действия ЛЗС и металлической крепи в зоне наибольшего проявления утечки тока, а также ввиду малого сопротивления растеканию естественных заземлителей.

Таким образом, предлагаемое усовершенствование представляет собой комплекс технических решений, функции которых взаимосвязаны, а результат состоит в ограничении емкости сети, предотвращении взаимного воздействия

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

компонентов присоединений разветвленной высоковольтной электросети, сопровождаемого значительным снижением активно-емкостных параметров, устранении условий для формирования проводимости между фазами и контуром «земля» в случае появления междуфазного короткого замыкания внутри кабеля. В совокупности, предложенные технические решения способствуют устранению условий для электропоражения человека, появления искрений и температурных перегрузок в элементах электрооборудования шахт. Предложенному комплексу технических решений соответствует структура системы высоковольтного электроснабжения подземных потребителей шахты, приведенная на рис. 3.

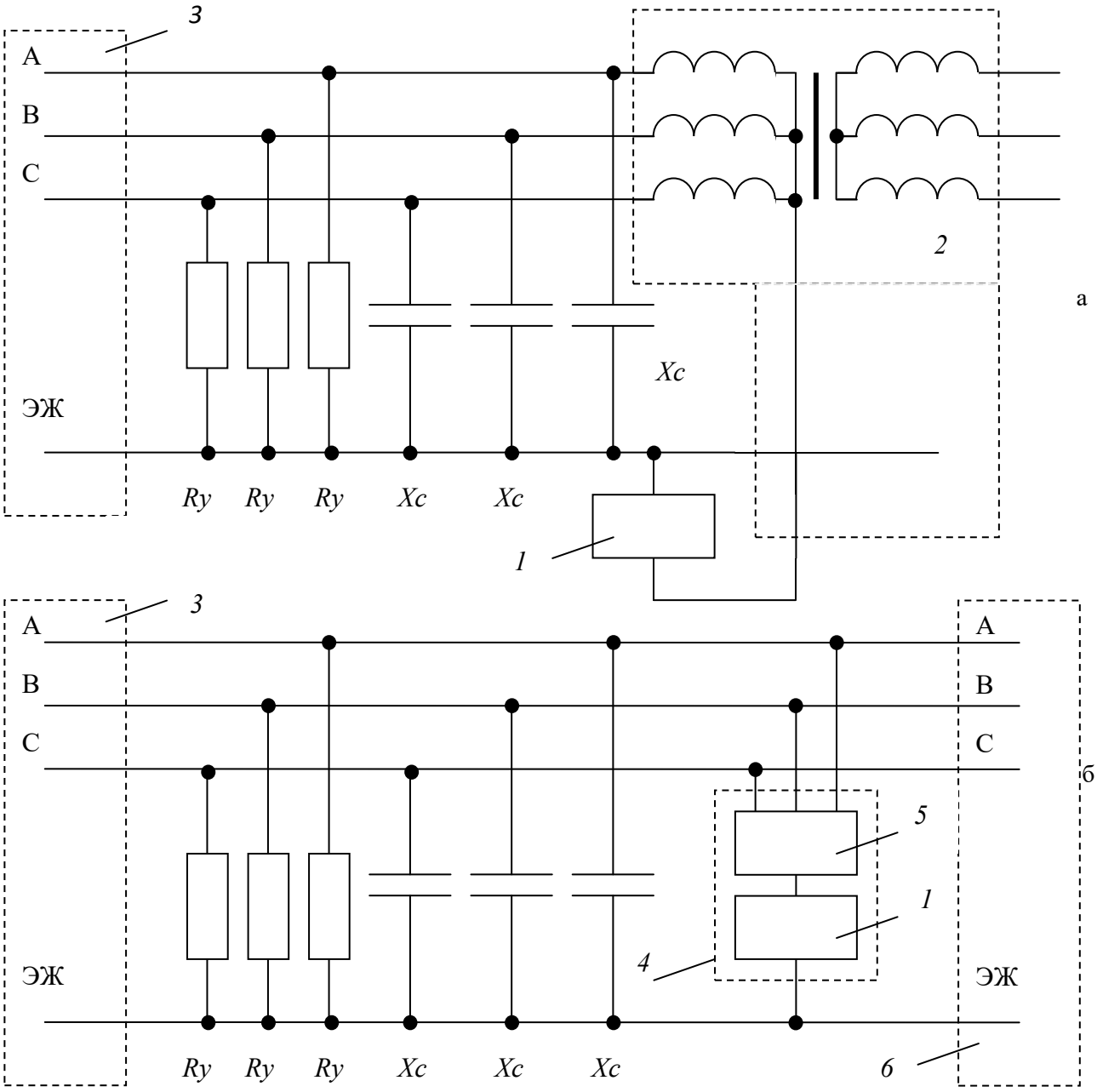


Рис. 3. Система подземного высоковольтного электроснабжения без использования общешахтной заземляющей сети с подключением узла *1* измерения токов утечки:
а – к общей точке обмоток трансформатора электропитания; *б* – непосредственно к фазам сети.
А, В, С – трехпроводная трехфазная сеть; ЭЖ – экранированная жила;
Ry – сопротивление активной утечки; *Xc* – сопротивление емкостной утечки;
2 – передвижная трансформаторная подстанция; *3* – комплектное распределительное устройство;
4 – устройство контроля токов утечки; *5* – присоединительный узел; *6* – электроприемник

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Особенностью построения системы электроснабжения является применение ЛЗС, расположенной в штреке и входящей структуру МЗ вместо ОЗС, и выполнение местного заземления с новыми защитными свойствами. Введение в структуру системы электроснабжения и кабеля экранной жилы позволило высоковольтную сеть разделить на самостоятельные участки. Ранее для этой цели использовали высоковольтный дорогостоящий разделительный трансформатор. Экранная жила, плотно прилегающая к изоляции основных жил в кабеле, служит коллектором для токов активной утечки. Емкости в кабельной сети в этом случае образованы между фазами и экранной жилой.

Система подземного высоковольтного электроснабжения (см. рис. 3а) приемлема на участке сети «комплектное распределительное устройство – передвижная трансформаторная подстанция». В ней для протекания токов утечки создается электрическая цепь «фаза сети – узел контроля и измерения 1 – нулевая точка высоковольтных обмоток передвижной трансформаторной подстанции». Впервые в системах электроснабжения (см. рис. 3) контроль токов утечки осуществляется на переменном токе, что позволяет выполнить локализацию как активной, так и емкостной утечек.

Система электроснабжения (см. рис. 3б) предусматривает подключение устройства контроля сопротивления изоляции 4 непосредственно к фазам сети. Оно содержит соединительный узел 5 и узел 1 измерения токов утечки. Цепи для контроля и измерения токов утечки образованы электрическими связями активной и емкостной проводимостей, обеспечивающими протекание токов утечки через узел 1.

Важным условием является выполнение кабеля с применением полимерных материалов, не активных к формированию емкости. Эти материалы должны быть предусмотрены для изготовления индивидуальных экранов основных жил и бронированной оболочки. Жила заземления в кабеле в этом случае не предусматривается.

Выводы

Установлены свойства общешахтной заземляющей сети, препятствующие достижению параметров, соответствующих критериям безопасности эксплуатации систем подземного высоковольтного электроснабжения. Предложено заменить общешахтную заземляющую сеть комплексом локальных заземляющих сетей при использовании кабелей, конструкция которых предусматривает применение диэлектрических материалов малой удельной емкости. Расчетами подтверждено обеспечение нормируемых параметров безопасности эксплуатации подземных высоковольтных сетей при реализации локальных заземляющих сетей вместо ОЗС.

Направлением дальнейших исследований является установление конкретных параметров конструкции кабелей, адаптированных к применению совместно с комплексом локальных заземляющих сетей.

Список литературы

1. Berryann, R.J. Evolution of Longwall Mining and Control Systems in the United States [Electronic resource] / R.J. Berryann, J.A. Voelker // Mine Safety and Health Administration, Division of Electric Safety. – Triadelphia, West Virginia, 2005. – Mode of access: www.msha.gov/s&hinfo/techrpt/electrical/lwcntrl.pdf
2. ГОСТ 28298. Заземление шахтного электрооборудования. Технические требования и методы контроля. – Введ. 01.07.1990. Минуглепром СССР. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://gostbank.metaltorg.ru/gost/19042/
3. Кизимов, Н.А. Исследование возможности обеспечения искробезопасности тока замыкания на землю шахтной участковой сети путем компенсации его емкостной составляющей // Вопросы горной электромеханики. – М.: Госгортехиздат, 1961. – Т.XII. Вып.4. – С. 28-38.
4. Антонов, Ю.П. Анализ обеспечения максимальной безопасности, при наличии утечек в шахтных кабельных сетях // Вопросы горной электромеханики.– М.:Госгортехиздат,1961. – Т.XI, вып.3. – С. 22-39.
5. Правила безопасности в угольных шахтах: НПАОП 10.0-1.01-16. – Макеевка: Полипресс, 2016. – 218 с.
6. El-Hawary, M.E. Electric Power Systems: Design and Analysis. – Wiley-IEEE Press, 2009. – 808 p.
7. Nelson, J.P. System Grounding, Ground Fault Protection and Electrical Safety. IEEE Press Series on Power Engineering / J.P. Nelson, P.K. Sen. – Wiley-IEEE Press, 2009. – 500 p.
8. Маренич, К.Н. Автоматическая защита электрооборудования шахт от аварийных и опасных состояний: уч. пособ. для высш. учебн. заведений / К.Н. Маренич, И.В. Ковалѐва. – Донецк: ООО «Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ», 2015. – 214 с.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

A.M. Bryukhanov /Dr. Sci. (Eng.)/, O.A. Demchenko /Cand. Sci. (Eng.)/, L.A. Mufel /Cand. Sci. (Eng.)/
State Makeevka Safety in Mines Research Institute (Makeevka)
K.N. Marenich /Dr. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)

LOCAL EARTHING NETWORKS – THE NEW SOLUTION TO ENSURE SAFE OPERATION OF THE UNDERGROUND HIGH-VOLTAGE POWER SUPPLY SYSTEMS

Background. *The concept of application of the general mine earthing network as a part of the system of power supply and cables with the earthing of the central conductor has exhausted the resource in the context of ensuring safe operating conditions of the electric equipment. Allocation of the high-voltage electrical network of underground consumers in a separate group of mines and the use of means of compensation of network capacity also does not allow achieving safe electrical parameters.*
Materials and/or methods. *The general mine earthing network is a mandatory element of the power supply system as a means of protecting personnel from electric shock. However, modern electrical networks are characterized by a considerable length and number of cables. In this regard, the general mine earthing network has a very high insulation capacity, which creates conditions for the danger of operation of electrical equipment. It is established that the safe operation of electrical equipment of the mine may be provided, subject to the application of the complicated local networks and earthing cables with low insulation capacity.*
Results. *The principal possibility established to provide safe operating parameters of the mine electrical network when using a complex of local earthing networks and cables of exclusive design with the use of polymers of low electrical capacity, shielding of power conductors and distribution of earthing conductors along the cable circuit near the outer surface. Acceptable parameters and configuration of the mine local earthing network scheme determined.*
Conclusion. *The properties of the earthing network, preventing the achievement of parameters that meet the criteria of safe operation of mine power systems, including high-voltage electrical systems. The proposed improvements suggest the replacement of the mine earthing network with a complex of local earthing networks when using cables, the design of which provides for the use of dielectric materials of low specific capacity, shielding of working cores and the distribution of the bulk earthing conductor along the cable contour near the surface of its shell. The calculations confirmed the provision of normalized safety parameters of operation of mine electrical installations in the implementation of the proposed technical solution.*

Keywords: *system, local earthing, local earthing network, general mine earthing network, earth leakage current, electric network capacity, cable, construction.*

Сведения об авторах
А.М. Брюханов
Телефон: +380 (71) 320-67-46
Эл. почта: maknii.ra@gmail.com
Л.А. Муфель
Телефон: +380 (71) 475-08-99
Эл. почта: maknii.ra@gmail.com
О.А. Демченко
Телефон: +380 (71) 373-92-58
Эл. почта: maknii.ra@gmail.com
К.Н. Маренич
SPIN-код: 8632-8425
Author ID: 377905
ORCID iD: 0000-0002-6309-4986
Телефон: +380 (71) 301-98-61
Эл. почта: knm1@donntu.org

Статья поступила 12.07.2019 г.
© А.М. Брюханов, О.А. Демченко, Л.А. Муфель, К.Н. Маренич, 2019
Рецензент д.т.н., проф. А.П. Ковалёв

УДК 621.313.333

К.Н. Маренич /д.т.н./, Е.С. Дубинка
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ДВУХСКОРОСТНОЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ КАК ОБЪЕКТ РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИИ ЗАЩИТНОГО ПОДАВЛЕНИЯ ОБРАТНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТОКА

Опасные состояния шахтной участковой электрической сети высокой мощности поддерживаются обратными энергетическими потоками асинхронных двигателей потребителей в режиме выбега после отключения напряжения питания. Концепция подавления обратных энергетических потоков асинхронных машин методом воздействия на их электромагнитные параметры проверена на примере управления электрическими параметрами отключенной обмотки статора двухскоростного асинхронного двигателя при его переходе в режим выбега. Средствами моделирования установлен эффект управления величиной обратной электродвижущей силы асинхронного двигателя.

Ключевые слова: *электротехнический комплекс, двухскоростной асинхронный двигатель, режим выбега, обратная электродвижущая сила, защитное обесточивание, управление параметрами, моделирование, функциональные зависимости.*

Постановка проблемы

Асинхронный двигатель (АД) благодаря своей надежности, компактности, простоте эксплуатации, неприхотливости и относительной дешевизне получил широкое распространение, как в электромеханических установках общего назначения, так и в составе оборудования шахтных участковых электротехнических комплексов [1,2]. Характерной особенностью этой электрической машины является формирование обратного энергетического потока в режиме выбега, когда начальная обратная электродвижущая сила (ЭДС) сопоставима по величине и частоте с аналогичными параметрами напряжения сети. Пропорциональность снижения амплитудно-частотных параметров обратной ЭДС АД величине обобщенного параметра индуктивности данной электрической машины дают основания рассматривать увеличение мощности применяемых АД в качестве фактора, повышающего опасность эксплуатации электрооборудования технологического участка, поскольку электрические машины высокой мощности, обладая повышенной общей индуктивностью, способны генерировать обратные ЭДС в сеть в течение значительного времени после отключения напряжения в ней. В связи с этим поиск технических решений в области быстродействующего подавления обратных энергетических потоков АД в режиме выбега представляет научную и практическую актуальность.

Анализ последних исследований и публикаций

Исследования в области предотвращения воздействия обратных энергетических потоков АД на электрическую сеть участковых электротехнических комплексов шахт после защитного отключения напряжения питания можно разделить на группы:

– обоснование параметров и структуры технических решений в области выявления опасных состояний силовых присоединений АД автономно действующими техническими средствами, функционирующими в присоединениях статоров электрических машин;

– обоснование принципов и разработка устройств ускоренного подавления обратных энергетических потоков АД в процессе защитного отключения сети технологического участка.

Задачи первой группы решены исследованиями [3,4], что позволило сформировать независимо от штатных средств защиты управляющую команду для исполнительно устройства подавления обратных энергетических потоков АД. В принципе это создало возможность получения эффекта автоматического защитного обесточивания шахтной участковой электросети.

Сложность решения задач второй группы состоит в необходимости реализации функции подавления обратного энергетического потока АД компактным силовым электрическим устройством, адаптированным к применению в условиях эксплуатации рудничного электрооборудования.

Исследованиями [5] установлена принципиальная возможность интенсивного ограничения параметров обратной ЭДС АД в режиме выбега путем создания контура короткого замыкания в специально созданной дополнительной не под-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

ключенной к сети обмотке статора. Недостаток такого решения связан с необходимостью принципиального изменения конструкции АД и оснащения этой электрической машины дополнительной трехфазной обмоткой статора. В то же время, существует целый класс асинхронных машин, содержащих две статорные обмотки. Это двухскоростные рудничные асинхронные двигатели, предназначенные для электроприводов шахтных конвейеров [6].

Поэтому исследование возможности подавления обратного энергетического потока двухскоростного АД в режиме выбега методом воздействия на электрические параметры не подключенной к сети второй обмотки статора с учетом различия числа пар полюсов статорных обмоток, других особенностей конструкции двухскоростного АД представляет научную и практическую актуальность.

Цель (задачи) исследования

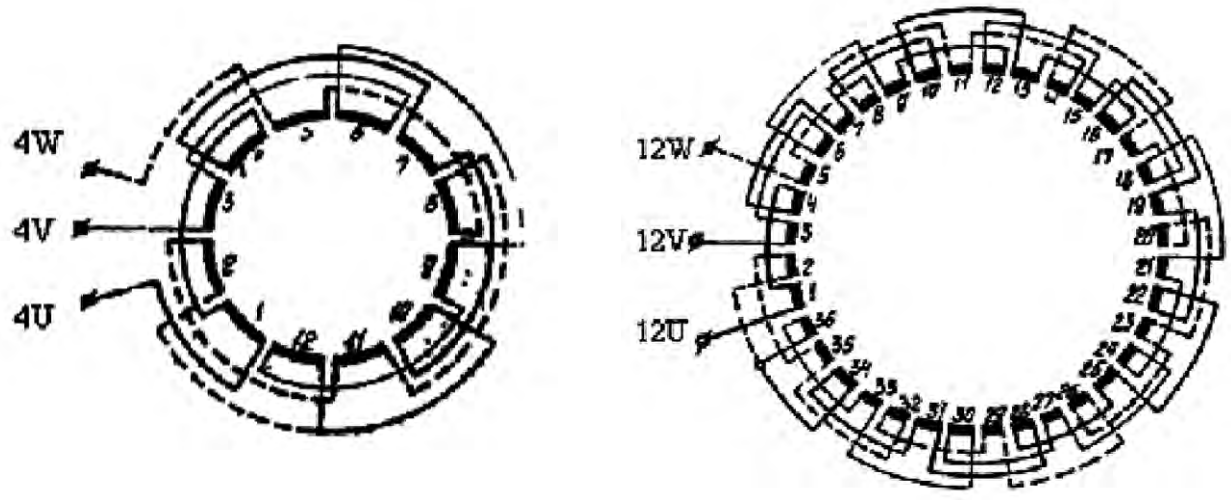
Целью исследования является установление возможности интенсивного снижения электрических параметров обратной ЭДС двухскоростного АД в режиме выбега путем управления электрическими параметрами второй, не подключенной к сети, обмотки его статора. Достижение этой цели предполагает разработку соответствующего математического аппарата и компьютерной модели.

Основной материал исследования

Специфика конструкции двухскоростного АД, существенно отличающая процессы подавления его обратного энергетического потока от объекта, рассмотренного в [5], заключается в различии числа полюсов двух обмоток статора, размещенных на общем магнитопроводе. Так, согласно [4,6], обмотка статора номинальной скорости содержит 4 полюса, а статора пониженной скорости – 12 полюсов (рис. 1). Это будет определять формирование в не подключенной к сети обмотке статора трансформаторной ЭДС, отличной по частоте от частоты сети, а по форме – от синусоиды.

Достижение цели исследования представляется выполнить поэтапно. В частности, на первом этапе должны быть определены закономерности формирования трансформаторной ЭДС в отключенной обмотке статора работающего двухскоростного АД. Общий подход к решению задачи этого этапа может быть построен на основе исследований [7] и состоять в следующем порядке действий: определение взаимной индуктивности между подключенной обмоткой статора и ротора в функции угла поворота ротора; определение мгновенных значений токов фаз подключенной обмотки статора и ротора; вычисление распределения магнитной индукции в воздушном зазоре двигателя как функции времени на основе информации о мгновенных значениях токов; расчет ЭДС пазовых проводников отключенной обмотки; определение ЭДС, которая наводится в каждой фазе отключенной обмотки, путем суммирования ЭДС пазовых проводников с учетом схемы соединения обмотки.

Процедурой определения взаимной индуктивности ротора и обмоток статора АД предусматривается выполнение расчета индукции магнитного поля в воздушном зазоре между статором и ротором (путем суммирования индукций статора и ротора).



а б

Рис. 1. Схемы обмоток статора двигателя серии ЭДКВФ:
а – обмотка номинальной скорости, число полюсов $2p$=4;
б – обмотка пониженной скорости, число полюсов $2p$=12

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Согласно [7,8], индукция результирующего поля в области каждого паза представляется в виде наложения индукции непарного поля от тока паза (с учетом предположения об отсутствии поля внешнего по отношению к пазу) и индукции парного поля (внешнего по отношению к пазу) пазов магнитопровода (с учетом предположения об отсутствии тока в данном пазу). При вычислении индукции парного и непарного полей в области каждого паза учитываются магнитодвижущие силы соответствующих катушек обмоток. Расчет потокосцепления фазной обмотки в этом случае выполняется на основании предварительного расчета суммы потокосцеплений обмоток, принадлежащих одной и той же фазе, с учетом сформированных пар полюсов. Делением потокосцепления фазы на ее ток (при отсутствии тока в других фазах статора и ротора) определяются величины собственных и взаимных индуктивностей ротора и обмоток статора.

Рассмотрим процесс формирования ЭДС в отключенной обмотке статора работающего АД в составе типового шахтного участкового электротехнического комплекса (рис. 2) применительно к электрической машине типа АДВК-355LA12/4 (табл. 1).

Для определения взаимной индуктивности $M(\theta)=\psi_{ra}/i_{sa}$, показывающей зависимость потокосцепления ψ_{ra} фазы ротора от тока i_{sa} фазы статора в функции угла θ поворота ротора, рассматривается случай подключения обмотки фазы статора к источнику тока, изменяющегося синусоидально с амплитудой 1А и частотой 50 Гц. Предполагается, что за период 0,02 с изменения тока ротор поворачивается на 2π рад. Путем интегрирования индукции в воздушном зазоре в пределах размещения каждой катушки статора, с учетом длины магнитопровода, вычисляется значение потокосцепления каждой катушки статора для каждого момента времени. Потокосцепление фазных обмоток статора определяется расчетом суммы потокосцеплений соответствующих катушек. Аналогично вычисляются потокосцепления фаз ротора.

Табл. 1. Параметры двигателя АДВК-355LA12/4

Номинальная мощность, кВт	Синхронная частота вращения, об/мин	КПД, %	cosφ	Скольжение, %	$M_{max}/M_н$	$M_п/M_н$	$I_н$, А	$I_п/I_н$
85/250	500/1500	84/92	0,57/0,87	2,4/1,5	-/2,1	2,6/1,8	90/158	2,5/5,3

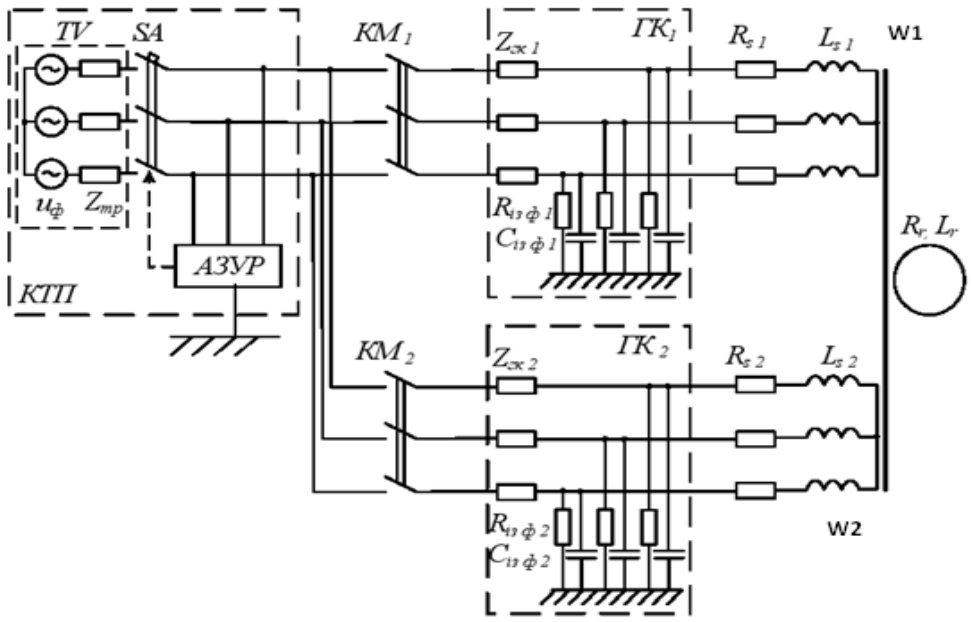


Рис. 2. Схема шахтного участкового электротехнического комплекса с двухскоростным асинхронным двигателем:
TV – трехфазный источник питания, трансформаторная подстанция с автоматическим выключателем *SA*; АЗУР – аппарат защиты от утечки тока на землю; KM_1, KM_2 – коммутационные аппараты; $ГК_1$, $ГК_2$ – гибкие кабели; R_{s1}, R_{s2}, L_{s1}, L_{s2} – активные сопротивления и индуктивности статоров; $Z_{тр1}$, $Z_{гк1}$, $Z_{гк2}$ – соответственно, полные сопротивления трансформатора и гибких кабелей $ГК_1$ и $ГК_2$; $R_{из\ ф1}$, $R_{из\ ф2}$, $L_{из\ ф1}$, $L_{из\ ф2}$ – сопротивления и емкости изоляции кабельной сети; *W*1, *W*2 – обмотки статора АД

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Величина $M(\theta)=\psi_{ra}/i_{sa}$ является четной функцией, для которой постоянная составляющая тригонометрического ряда Фурье равна нулю, $a_0=0$, и амплитуды синусоидальных составляющих являются нулевыми, $b_k=0$, то есть при анализе можно ограничиться определением только амплитуд a_k косинусоидальних составляющих. Зависимость $M(\theta)$ для параметров рассматриваемого двигателя представлена выражением:

$$M(\theta)=8{,}57\cdot10^{-2}\cdot\cos(2\theta)+4/12\cdot10^{-3}\cdot\cos(6\theta)+ +2{,}66\cdot10^{-3}\cdot\cos(34\theta)-2{,}95\cdot10^{-3}\cdot\cos(38\theta). \quad (1)$$

Отклонение полученных согласно уравнению (1) значений взаимной индуктивности $M(\theta)$, при учете только 2, 6, 34, 38 гармоник, от значений, рассчитанных по кривой индукции, не превышает 3 %, что допустимо для инженерных расчетов. Это позволяет упростить дальнейшие расчеты учетом только указанных гармоник для анализа кривой взаимной индуктивности статора и ротора.

Матричное дифференциальное уравнение, описывающее переходные процессы в асинхронном короткозамкнутом двигателе относительно составляющих потокосцеплений с учетом угла поворота ротора θ, представляется следующим выражением [7,8,9]:

$$\frac{d\overline{\psi}_{АД}}{dt}=\overline{F}_{АД}\cdot\overline{\psi}_{АД}+\overline{G}_{АД}\cdot\overline{S}_{АД}+\overline{H}_{АД}\cdot\overline{U}_{АД}, \quad (2)$$

где $\overline{\psi}_{АД}=\left[\psi_{s\alpha}\quad\psi_{s\beta}\quad\psi_{r\alpha}\quad\psi_{r\beta}\quad\omega\quad\theta\right]^T$ – вектор переменных состояний; $\overline{G}_{АД}$, $\overline{H}_{АД}$ – матричные константы; $\overline{S}_{АД}=\left[-\omega\psi_{r\beta}\quad\omega\psi_{r\alpha}\quad(M_e-M_c)/J\right]^T$ – вектор нелинейных соотношений между переменными состояния; $\overline{U}_{АД}=\left[u_{AB}\quad u_{BC}\quad u_{CA}\right]^T$ – вектор линейных напряжений статора; $\overline{F}_{АД}=\overline{R}\cdot\overline{M}^{-1}(\theta)$, причем $\overline{R}$ матрица, учитывающая сопротивления контуров статора и ротора; $\overline{M}^{-1}(\theta)$ – матрица, обратная к матрице индуктивностей $\overline{M}(\theta)$ двигателя:

$$\overline{\mathrm{M}}(\theta)=\begin{bmatrix}L_1 & 0 & M_3 & M_4 & 0 & 0\\ 0 & L_1 & -M_4 & M_3 & 0 & 0\\ M_3 & -M_4 & L_1 & 0 & 0 & 0\\ M_4 & M_3 & 0 & L_1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix},$$

$$\overline{M}^{-1}(\theta)=\begin{bmatrix}L_1/M_{10} & 0 & M_3/M_{10} & -M_4/M_{10} & 0 & 0\\ 0 & L_1/M_{10} & M_4/M_{10} & -M_3/M_{10} & 0 & 0\\ -M_3/M_{10} & -M_4/M_{10} & L_1/M_{10} & 0 & 0 & 0\\ M_4/M_{10} & -M_3/M_{10} & 0 & L_1/M_{10} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix},$$

причем

$$M_{10}=L_1^2-M_3^2-M_4^2,$$

$$M_3=M(\theta)-\frac{M(\theta-\rho)}{2}-\frac{M(\theta+\rho)}{2},$$

$$M_4=\frac{\sqrt{3}}{2}\left[M(\theta+\rho)-M(\theta-\rho)\right],$$

$$L_1=L_\sigma+\frac{3}{2}L,$$

где L – собственная индуктивность обмотки статора (ротора); L_σ – индуктивности рассеяния статора и ротора (в предположении об их тождестве); $\rho=2\pi/3$ – взаимоиндуктивность между фазами статора и ротора в функции угла поворота ротора.

Учитывая в выражении для определения $\overline{F_{АД}}$ обратную матрицу индуктивности $\overline{M}^{-1}(\theta)$, получим:

$$\overline{F}_{АД}=\begin{bmatrix}b_1 & 0 & b_3 & b_4 & 0 & 0\\ 0 & b_1 & -b_4 & b_3 & 0 & 0\\ b_5 & -b_6 & b_2 & 0 & 0 & 0\\ b_6 & b_5 & 0 & b_2 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0\end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$b_i=\begin{cases}-R_x\dfrac{L_1}{M_{10}}, i=1,2;\\ R_x\dfrac{M_j}{M_{10}}, i=3\div6,\end{cases} \quad (4)$$

где R_x (соответствующее сопротивление статора и ротора) и M_j (соответствующее значение момента двигателя) определяются из табл. 2.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Табл. 2. Значения величин R_x и M_j для выражения (4)

i	1	2	3	4	5	6
R_x	R_s	R_r	R_s	R_s	R_r	R_r
M_j	-	-	M_3	M_4	M_3	M_4

Мгновенные значения токов фаз подключенной обмотки статора и ротора рассчитываются с использованием соотношения:

$$\bar{I}_{\alpha\beta} = \overline{M}^{-1}(\theta) \cdot \bar{\psi}_{АД}, \qquad (5)$$

где $\bar{I}_{\alpha\beta} = \left[i_{s\alpha} \quad i_{s\beta} \quad i_{r\alpha} \quad i_{r\beta} \quad \omega \quad \theta \right]^T$ – вектор проекций токов двигателя.

Для вычисленных таким образом значений токов определяются распределения магнитной индукции в воздушном зазоре двигателя для каждого момента времени. Рассмотрим случай размещения в пазах статора двигателя АДВК-355LA12/4 второй однослойно концентрической обмотки ($W2$) при $2p$=6, m=3, z=36, q=2, a=1, W_{c2}=40, которая отключена от источника питания. С учетом схемы отключенной обмотки статора $W2$ рассчитывается ЭДС проводников каждого паза:

$$e_{паз.}(t)=W \cdot B(t) \cdot L \cdot R \cdot \omega,$$

где W – количество проводников в пазу; B – индукция поля, соответствующая положению паза; L – активная длина проводника; R – радиус вращения проводника; ω – круговая скорость относительного вращения поля и проводника.

Определенные таким образом ЭДС пазовых проводников суммируются (с учетом схемы соединения обмотки), в результате чего может быть получена ЭДС e_2, индуктируемая в каждой фазе отключенной обмотки $W2$. Для двигателя АДВК-355LA12/4 (U=660 В), статор которого оборудован дополнительной обмоткой, график мгновенных значений такой ЭДС приведен на рис. 3.

Полученный результат позволяет сделать предположение о потенциально опасной (по фактору электропоражения человека) величине ЭДС в отключенной от сети обмотке $W2$ статора работающего двухскоростного АД. Действительно, применительно к схеме (см. рис. 2), ток в цепи утечки, $R_{ут}$=1 кОм, между фазой и контуром «земля» (рис. 4), формируемый данной ЭДС, создает уровень количества электричества q в цепи утечки, превышающий безопасное значение (q=50 mA·c) уже спустя 0,1 с, начиная с момента появления утечки, т.е. касания человеком токоведущего элемента отключенной от сети обмотки $W2$ статора АД (рис. 5). Это обусловливает необходимость учитывать электропоражающий фактор ЭДС этой обмотки.

В то же время, ЭДС, индуктируемая в отключенной от сети обмотке $W2$ статора двухскоростного АД, может быть рассмотрена как фактор формирования возмущающего воздействия относительно ЭДС, индуктируемой в рабочей обмотке $W1$ статора АД в режиме выбега. Для исследования процесса применима описанная выше методика при условии корректировки начальных условий применительно к процессу выбега двухскоростного АД, а именно:

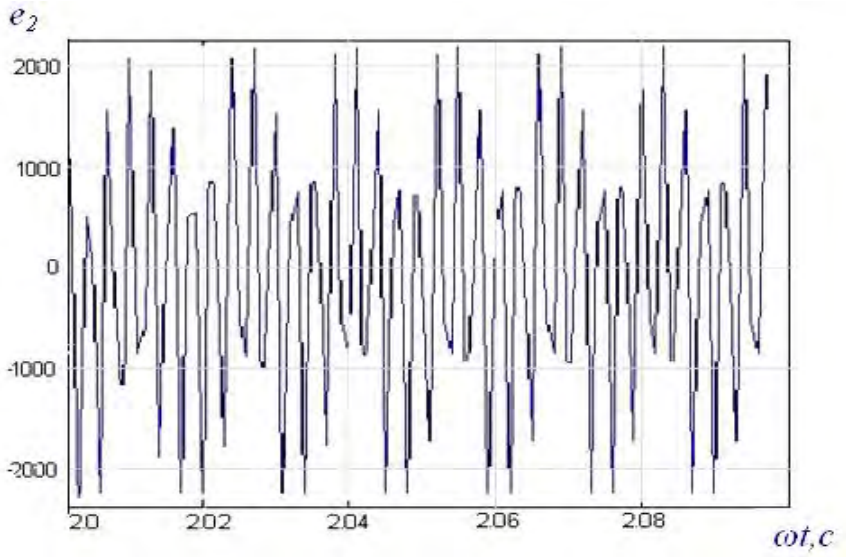


Рис. 3. Диаграммы величин ЭДС в отключенной обмотке $W2$ фазы статора двухскоростного асинхронного двигателя АДВК-355LA12/4

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

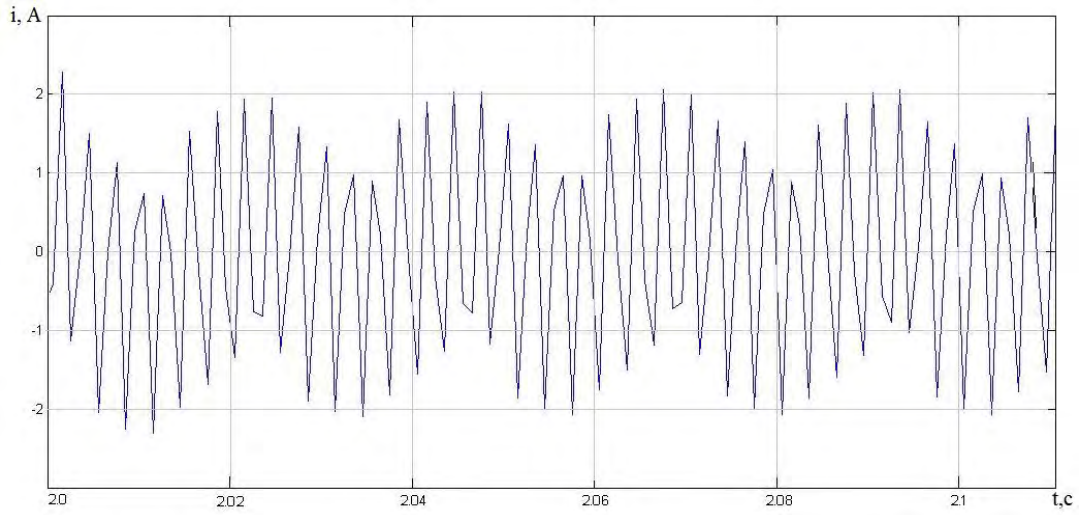


Рис. 4. Мгновенные значения тока утечки на землю через тело человека в случае касания жилы кабеля отключенной обмотки *W*2 двухскоростного АД

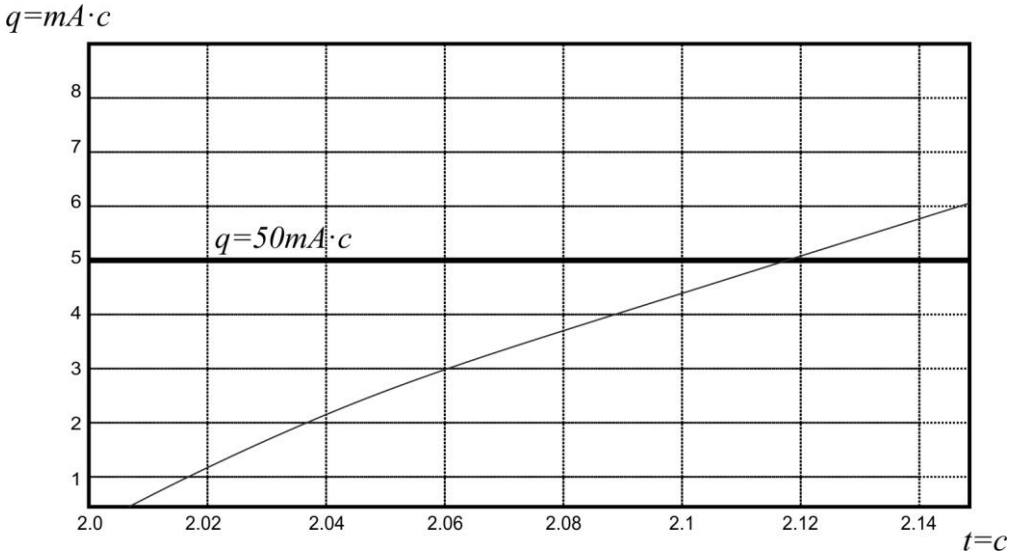


Рис. 5. Диаграммы величин количества электричества q через сопротивление утечки тока на землю, $R_{ут}$=1 кОм, при касании к отключенной от сети обмотке *W*2 АД, по рис. 2

– рабочая обмотка *W*1 статора, будучи отключенной от сети, из генерирующего объекта переходит в состояние пассивного, в ней индуктируется ЭДС e_1 вращающимся полем токов ротора, снижающаяся по амплитуде и частоте экспоненциально;

– ротор сохраняет активное (генерирующее) состояние в течение экспоненты, определяемой постоянной времени АД (отношением обобщенной индуктивности обмоток и цепей намагничивания к обобщенному сопротивлению);

– при закорачивании отключенной от сети второй обмотки *W*2 статора в ней возникает цепь тока на временно́м интервале генерации ЭДС со стороны ротора, и в этом случае данная обмотка выполняет также генерирующую функцию в отношении ранее включенной рабочей обмотки статора;

– начальным состоянием отключенной от сети обмотки *W*2 статора двухскоростного АД следует считать генерацию в ней рассчитанной выше ЭДС e_2 (см. рис. 3).

Применительно к обмотке пониженной скорости (*W*2) двигателя АДВК-355LA12/4 на основании анализа диаграмм (см. рис. 3, 4) делаем вывод о превалировании в ЭДС e_2 частот 50 Гц и 720 Гц. Полагаем, что эта ЭДС и является начальной в рассматриваемой обмотке *W*2 статора АД для интервала выбега двигателя (после отключения напряжения питания с рабочей обмотки).

В этом случае, рассматривая генерирующую функцию данной обмотки после ее закорачивания, может быть введено допущение о наличии в ней трех источников ЭДС, соединенных последовательно: ЭДС частот 50 Гц (источники *V*1…*V*3); 720 Гц (источники *V*4…*V*6); и экспоненты (источники *V*7…*V*9), определяемой постоянной вре-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

мени двигателя (рис. 6). Форма фазной ЭДС этой обмотки (до закорачивания), полученная в результате моделирования в соответствии с принятой выше методикой, приведена на рис. 7.

С учетом этих допущений структуры схемы (рис. 6) форма ЭДС, генерируемая в разомкнутой ранее отключенной от сети обмотке $W2$ статора двухскоростного АД в режиме выбега, представлена на рис. 8, а в случае закорачивания этой обмотки в момент времени t_1 – на рис. 9.

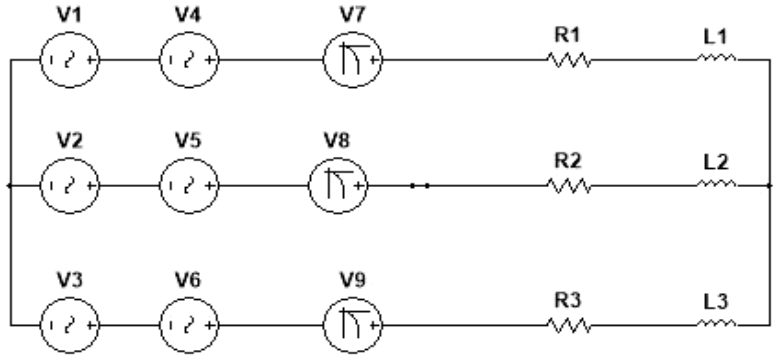


Рис. 6. Расчетная схема отключенного от сети статора двухскоростного АД, представленного элементами $R1 \ldots R3$; $L1 \ldots L3$ в режиме выбега при условии закорачивания его схемы

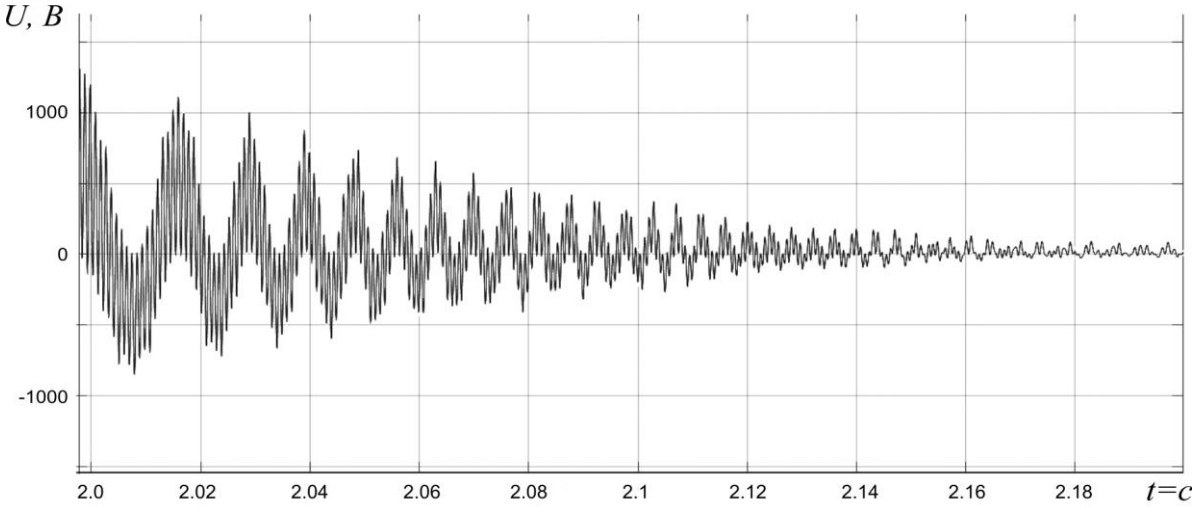


Рис. 7. Форма фазной ЭДС в отключенной обмотке $W2$ статора двухскоростного АД в режиме выбега, полученная в результате моделирования

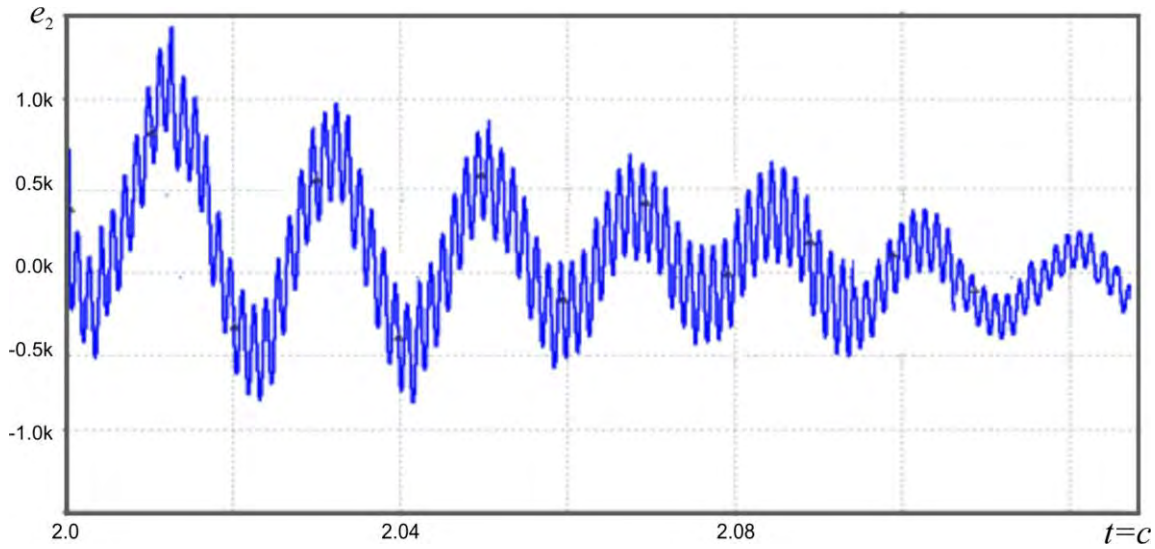


Рис. 8. Фрагмент осциллограммы фазной ЭДС e_2 отключенной обмотки $W2$ статора двухскоростного АД в режиме выбега, полученный моделированием с учетом допущений и расчетной схемы рис. 6

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

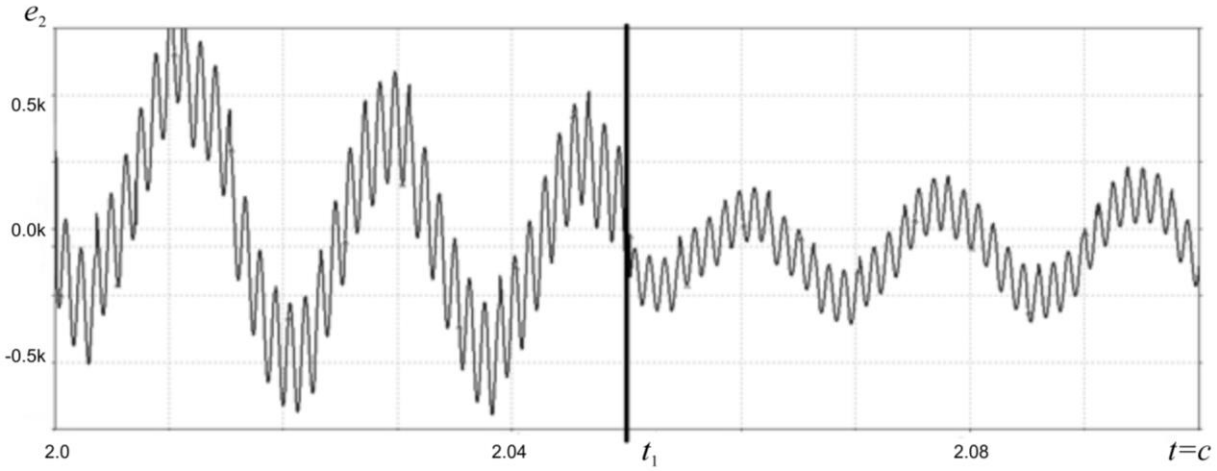
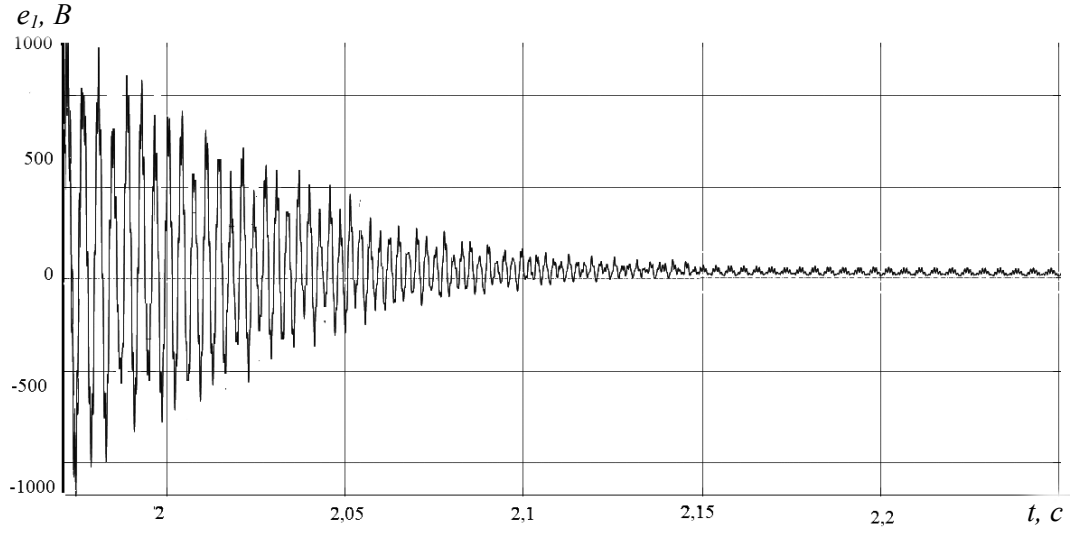
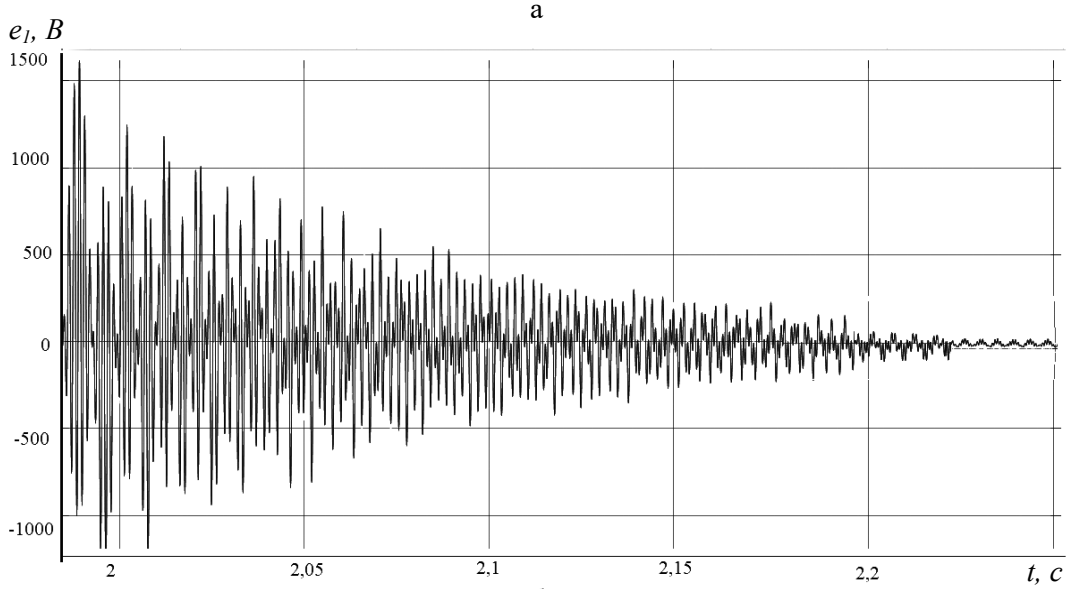


Рис. 9. Фрагмент осциллограммы фазной ЭДС e_2 отключенной обмотки $W2$ статора двухскоростного АД в режиме выбега, иллюстрирующий процесс закорачивания обмотки статора в момент времени t_1, полученный моделированием с учетом допущений и расчетной схемы рис. 6



а



б

Рис. 10. Диаграммы величин формирования обратных ЭДС в обмотке $W1$ статора двухскоростного АД:
а – с учетом замыкания цепи обмотки $W2$ статора;
б – без учета замыкания цепи обмотки $W2$ статора

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Учитывая генерирующую функцию отключенной обмотки *W*2 двухскоростного АД в режиме выбега, начиная с момента ее закорачивания, рассчитанную величину тока в этой обмотке и генерирующую функцию ротора, на основании методики [3,5] может быть получена кривая фазной ЭДС, индуктируемой в рабочей обмотке *W*1 статора двухскоростного АД (см. рис. 10). Сопоставляя формы ЭДС при наличии (см. рис. 10а) и отсутствии (см. рис. 10б) возмущающего действия со стороны обмотки *W*2, можно сделать вывод о наличии эффекта ограничения продолжительности формирования ЭДС в обмотке *W*1.

Применительно к проблематике электробезопасности это создает эффект ограничения количества электричества *q* в цепи утечки тока на землю (при касании человеком токоведущих элементов обмотки *W*1) на временно́м интервале выбега двухскоростного АД, в т.ч. на безопасном уровне ($q \leq 50$ мА·с, рис. 11). Однако процессу свойственна инерционность (отсутствие мгновенного снижения до нуля величины ЭДС в обмотке *W*1), что не позволяет делать вывод о рассматриваемом способе как гарантирующем снижение электрических параметров обратного энергетического потока АД в режиме выбега до безопасного уровня.

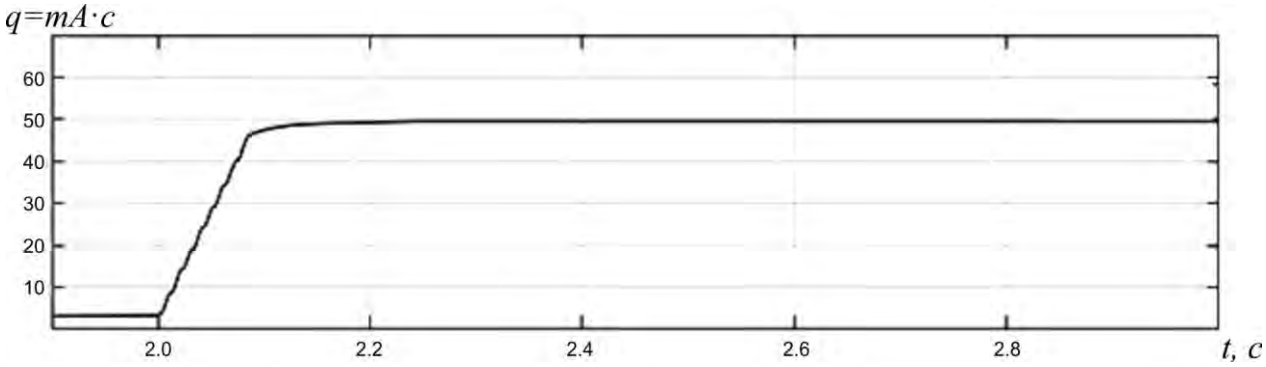


Рис. 11. Диаграмма величины накопления количества электричества *q* через сопротивление цепи утечки тока на землю, $R_{ут}$=1 кОм, между рабочей обмоткой *W*1 статора двухскоростного АД и контуром «земля» при наличии ограничивающего эффекта со стороны закороченной отключенной обмотки *W*2 статора того же двигателя в режиме выбега

Выводы

Методика исследования процессов в асинхронных машинах с учетом взаимной индуктивности обмоток статора и ротора адаптирована применительно определению электрических параметров отдельных функциональных элементов двухскоростного асинхронного двигателя в рабочем режиме эксплуатации и в режиме выбега. Представлены примеры расчета параметров электробезопасности в присоединениях обмоток статора. Установлена потенциальная возможность ограничения параметров обратного энергетического потока со стороны рабочей обмотки статора двухскоростного АД в режиме выбега посредством замыкания отключенной статорной обмотки этого же двигателя и снижения количества электричества в цепи утечки в присоединении данной обмотки и контура «земля», в т.ч. до безопасной величины. В то же время, выявлены показатели инерционности подавления обратной ЭДС обмотки статора двухскоростного АД, что не позволяет гарантированно обеспечить безопасные эксплуатационные параметры в силовых присоединениях двухскоростного АД после его отключения от сети.

Список литературы

1. High voltage mining equipment for use underground: handbook. – Sydney, N.S.W.: Standards Australia, 2007. – 68 p.
2. Berryann, R.J. Evolution of Longwall Mining and Control Systems in the United States [Electronic resource] / R.J. Berryann, J.A. Voelker // Mine Safety and Health Administration, Division of Electric Safety. – Triadelphia, West Virginia, 2005. – Available at: https://pdfs.semanticscholar.org/6827/53887a0b319296f716beb11b9f01273115a1.pdf?_ga=2.1670840.803898779.1508794395-959523617.1508794395
3. Маренич, К.М. Наукові основи впровадження автоматичного захисного двобічного знеструмлення шахтної дільничної електромережі: монографія / К.М. Маренич, І. В. Ковальова. – Донецьк: ДонНТУ, 2012. – 125 с.
4. Маренич, К.Н. Теоретические основы и принципы применения защитного обесточивания рудничных электротехнических комплексов: монография. – Донецк: Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ», 2015. – 234 с.
5. Дубинка, Е.С. Управление электромагнитным состоянием асинхронной машины как

способ ограничения параметров обратного энергетического потока / Е.С. Дубинка, К.Н. Маренич // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – №4. Т.17. – С. 39-47.
6. Взрывозащищенные асинхронные двигатели: выбор, эксплуатация и ремонт / В.В. Каика и др.; под общ. ред. В.В. Каики. – Донецк: Юго-Восток, 2010. – 360 с.
7. Сивокобиленко, В.Ф. Оцінка електробезпеки експлуатації двошвидкісних двигунів у складі дільничних електромереж шахт / В.Ф. Сивокобиленко, Я.О. Ляшок // Наукові праці ДонНТУ, серія «Електротехніка і енергетика». – Донецьк: ДонНТУ, 2015. – №1(17). – С. 5-12.
8. Lipo, T.A. Dual Stator Winding Induction Machine Drive / T.A. Lipo, A.R. Muñoz // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2000. – No.5. Vol.36. – P. 1369-1379.
9. Pienkowski, K. Analysis and Control of Dual Stator Winding Induction Motor. – 2012. – Arch. Electr. Eng. – No.61. – P. 421-438.

K.N. Marenich /Dr. Sci. (Eng.)/, E.S. Dubinka
Donetsk National Technical University (Donetsk)

THE DUAL STATOR-WINDING ASYNCHRONOUS MACHINE AS AN OBJECT OF REALIZATION THE FUNCTION OF PROTECTIVE SUPPRESSION OF REVERSE ENERGY FLOW

Background. *The paper describes the methodology for studying processes in asynchronous machines concerning the mutual inductance of the stator and rotor windings, which is adapted to determine the electrical parameters of individual functional elements of a two-speed asynchronous motor in the operating mode and the coast down mode. Examples of calculating the safety parameters of the electrical connections of the stator windings presented.*
Materials and/or methods. *The dangerous states of the mine precinct electrical network are supported by the reverse energy flows of asynchronous motors in the run-down mode after disconnecting the supply voltage. A mathematical apparatus and a computer model developed that allow establishing the potential for reducing the electrical parameters of the reverse EMF of a two-speed asynchronous motor in coasting mode by controlling the electrical parameters of the second winding of its stator not connected to the electrical network during operation.*
Results. *The potential possibility of limiting the parameters of the reverse energy flow from the working winding of the stator of a two-speed asynchronous motor in the coasting mode is established by closing another disconnected stator winding of the same engine and reducing the amount of electricity in the leakage circuit in the connection of this winding to the ground circuit magnitudes.*
Conclusion*. The concept of suppressing the return energy flows of asynchronous machines by the method of influencing their electromagnetic parameters was tested using the example of controlling the electrical parameters of a disconnected stator winding of a two-speed asynchronous motor during its transition to run-down mode. The simulation tools established the effect of controlling the magnitude of the inverse EMF of an induction motor.*

Keywords: *electrotechnical complex, two-speed asynchronous motor, coasting mode, reverse electromotive force, protective deenergizing, parameter control, modeling, functional dependencies.*

Сведения об авторах

К.Н. Маренич
SPIN-код: 8632-8425
Author ID: 377905
ORCID iD: 0000-0002-6309-4986
Телефон: +380 (71) 301-98-61
Эл. почта: knm1@donntu.org

Е.С. Дубинка
SPIN-код: 3110-5247
ORCID iD: 0000-0002-3003-6421
Телефон: +380 (71) 302-74-94
Эл. почта: ekaterina_sd@bk.ru

Статья поступила 22.07.2019 г.
© К.Н. Маренич, Е.С. Дубинка, 2019
Рецензент д.т.н., доц. И.А. Бершадский

УДК 622.647.1

О.К. Маренич
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)
Е.В. Золотарёв
ГУ «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования» (Донецк)

ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДСТВ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО РАЗРЫВА ЦЕПИ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ ШАХТНОЙ УЧАСТКОВОЙ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ

Разработана схема стенда и выполнены экспериментальные исследования концептуальной схемы ограничения энергетических показателей плазмообразования в силовых контактных группах автоматического выключателя А3792У шахтной комплектной трансформаторной подстанции при отключении междуфазных коротких замыканий. Подтверждены предположения о возможности повышения ресурса автоматического выключателя на основе использования дополнительных быстродействующих устройств ограничения продолжительности протекания тока короткого замыкания в процессе его защитного отключения.

Ключевые слова: *электротехнический комплекс, трансформаторная подстанция, автоматический выключатель, короткое замыкание, электрическая дуга, ресурс, ускоренное обесточивание, схема, экспериментальные исследования, анализ.*

Постановка проблемы

Применение на угледобывающих предприятиях электромеханического оборудования высокой мощности стало общепринятой в мире тенденцией и предопределило перевод систем электроснабжения технологических участков шахт на номинальные напряжения высоких уровней [1,2]. В этих условиях адаптация низковольтного автоматического выключателя (АВ) А37ХХ к трехфазным электрическим сетям линейного напряжения 1140 В является экономически обоснованным решением, поскольку позволяет существенно сократить расходы на проектирование, производство и эксплуатацию шахтных участковых комплектных трансформаторных подстанций (КТП) высокой мощности. Опыт эксплуатации таких адаптированных автоматических выключателей (А3792У) в целом показал их достаточные функциональные возможности в области коммутации рабочих нагрузок, однако выявил проблемные вопросы, связанные с последствиями коммутационных плазмообразований при отключении междуфазных коротких замыканий, возникающих в непосредственной близости от трансформаторной подстанции. В частности, зафиксированы неединичные случаи внутреннего пробоя междуфазных полюсов автоматического выключателя после процедуры отключения внешнего междуфазного короткого замыкания (КЗ).

Исследованиями [3] выявлено наличие металлизации диэлектрических элементов конструкции автоматического выключателя вблизи силовых контактных групп, что с учетом теоретических положений в области коммутационного плазмообразования в сильноточных электрических цепях [4,5] дает основания к исследованиям и разработкам в области снижения энергетических параметров электрической дуги в силовых контактных группах автоматического выключателя А3792У при отключении внешних междуфазных КЗ. Безусловный практический интерес представляют результаты экспериментов в этой области.

Анализ последних исследований и публикаций

Принимая во внимание концепцию коммутационного плазмообразования [6] при отключении тока КЗ сети напряжения, превышающего 1000 В, в качестве основной причины металлизации внутренних диэлектрических элементов автоматического выключателя А3792У, теоретические положения [5], согласно которым фактором снижения энергетических показателей плазмообразования является сокращение продолжительности данного процесса, а также наличие задержки времени на формирование плазмы, обусловленное временем нагрева металла кон-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

тактов выключателя до температуры испарения, представляется целесообразным применить дополнительные технические решения для быстродействующего автоматического разрыва цепи КЗ в качестве средства, повышающего ресурс автоматического выключателя А3792У при эксплуатации в составе КТП в шахтной электросети напряжения 1140 В. Согласно [7], для данных целей может быть предложен способ разрыва цепи «звезда» вторичной трехфазной обмотки трансформатора КТП. С этой целью фазные обмотки трансформатора могут быть подключены к входу силового мостового выпрямителя, нагрузкой которого может быть предохранитель (перегорающий при возникновении тока КЗ) либо однополюсный контактор, отключаемый по команде устройства максимальной токовой защиты (МТЗ). Эффективность такого решения может быть выявлена по факту одновременного либо опережающего срабатывания по отношению к процессу отключения АВ КТП на основе анализа измеренных параметров. Этим определяется актуальность экспериментальных исследований в данной области.

Цель (задачи) исследования

Целью исследования является установление фактических функциональных возможностей концептуальной схемы ограничения энергетических параметров коммутационного плазмообразования при отключении автоматическим выключателем А3792У тока трехфазного короткого замыкания на основании результатов экспериментов.

Условием достижения этой цели является решение задачи создания экспериментального стенда, программы, методики и собственно выполнения экспериментов в условиях эксплуатации силовой электрической схемы с цепью трехфазного короткого замыкания при формировании токов КЗ различной величины.

Основной материал исследования

Применительно к концептуальной схеме устройства ограничения энергетических показателей плазмообразования при отключении короткого замыкания (рис. 1) специфика экспериментов заключается в практической невозможности их проведения на реальном объекте ввиду крайне высоких мощностей реальных трехфазных коротких замыканий в промышленной электросети линейного напряжения 1140 В, в присоединениях трансформаторных подстанций высоких мощностей (630 кВА, 100 кВА, 1250 кВА, 1600 кВА и т.п.). Подобные опыты, предполагающие создание реальных междуфазных КЗ, характеризуются опасностью воспламенения силового электрооборудования и защитным отключением силовых высоковольтных коммутационных устройств в муниципальных электрических сетях внешних присоединений.

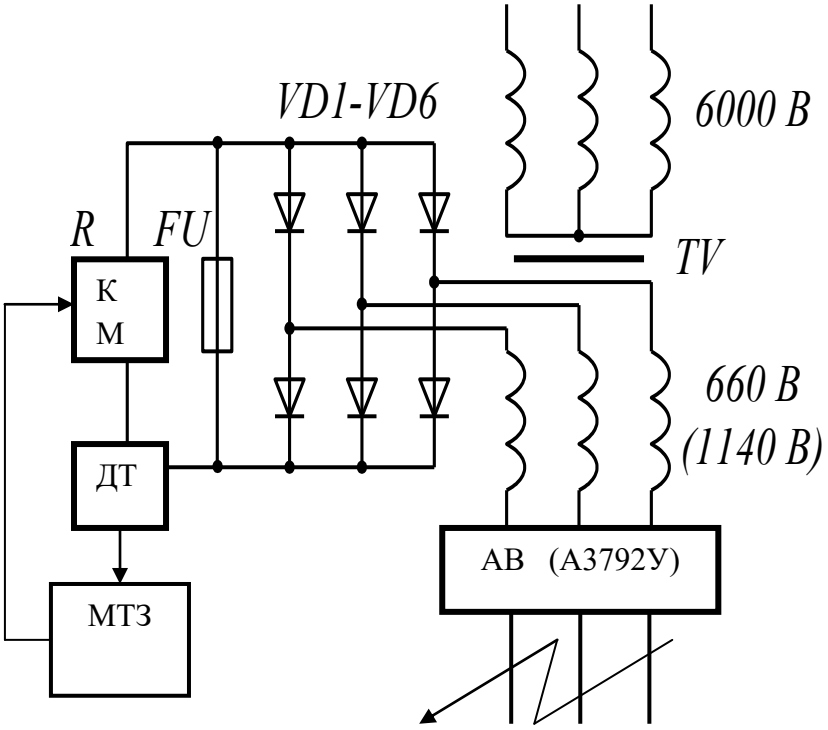


Рис. 1. Концептуальная схема реализации принципа ограничения энергетических показателей плазмообразования в автоматическом выключателе А3792У при отключении цепи внешнего короткого замыкания

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

В связи с этим целесообразно исследование физической модели с масштабированием параметров реального объекта. Практическую актуальность представляет выяснение возможностей предохранителя как сопутствующего защитного элемента, последовательно соединенного в цепи силовых контактов автоматического выключателя, ускоренно либо совместно с другими видами максимальных токовых защит реагировать на междуфазные КЗ в присоединении, отходящем от АВ. В этой связи в качестве сопоставимых средств максимальной токовой защиты должны рассматриваться расцепители максимального тока АВ, а также дополнительная внешняя максимальная токовая защита, воздействующая на независимый расцепитель АВ. Поскольку оперативным параметром реагирования выступает электрический ток, в составе экспериментального стенда предусмотрен регулируемый трехфазный источник тока.

Указанные соображения определяют структуру лабораторного стенда (рис. 2). Трехфазное линейное напряжение сети 380 В преобразуется силовым автотрансформатором TV1 (АТМК-250) в трехфазное напряжение регулируемой величины в диапазоне от 5 В до 400 В. В последующем это напряжение поступает на нагружающий силовой трансформатор TV2 (ТСУ-160), имеющий понижающий коэффициент трансформации $k_{тр}$=10. Это создает возможность подключить к выходу вторичной трехфазной обмотки трансформатора TV2 цепь трехфазного КЗ и создать в ней ток до 6000 А. В качестве внешней цепи трехфазного КЗ, подключаемой к выходу АВ (А3792У), могут бать использованы медные плавкие элементы предохранителей FU1, FU2, состоящие из расчетного количества провода из материала «медь» марки М1р ГОСТ 859-78. В результате измерения диаметра d проводника рассчитывается ток его плавления $I_{пл} = 80\sqrt{d^3}$ и определяется необходимое количество параллельных проводников применительно к расчетному значению этого тока.

В качестве внешнего устройства максимальной токовой защиты принимаем серийное изделие БЗУ-ТП, применяющееся в шахтных участковых КТП серии ТВПШ. Его схема предполагает воздействие на независимый расцепитель АВ [8].

Альтернативой по отношению к применению предохранителя в схеме ограничения энергетических параметров цепи КЗ может быть применение контактора в цепи нагрузки выпрямителя (см. рис. 1), отключаемого по сигналу максимальной токовой защиты. Временно́й интервал срабатывания контактора не должен зависеть от величины тока в защищаемой сети.

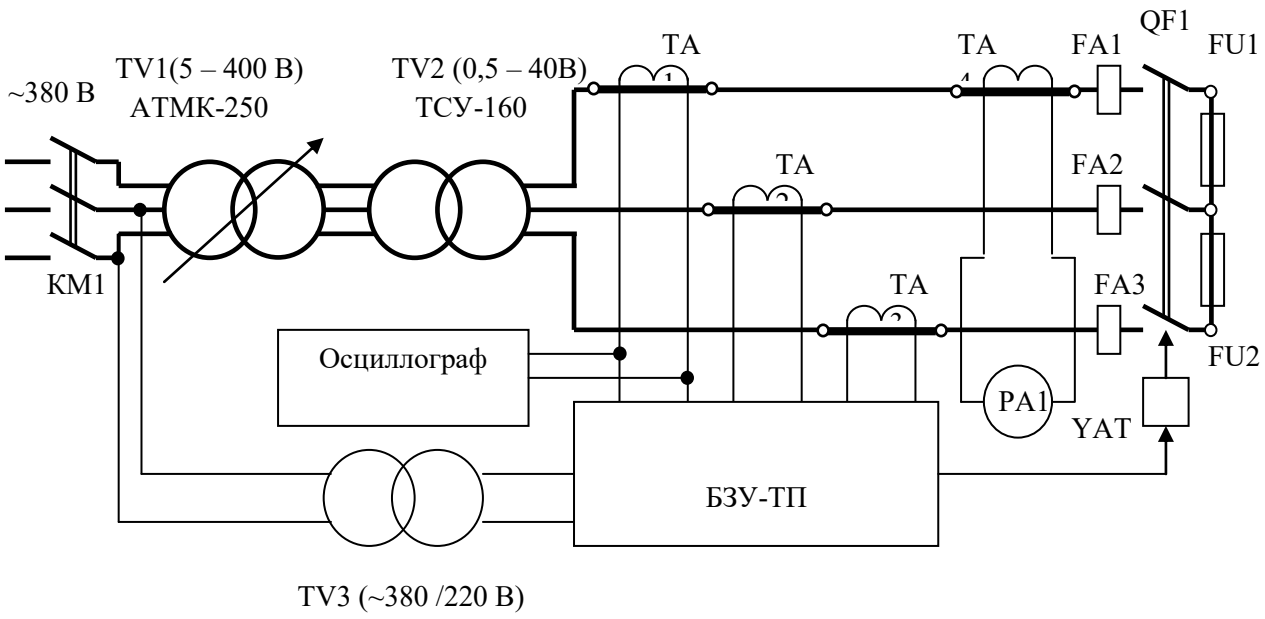


Рис. 2. Схема лабораторного стенда для проведения экспериментальных исследований параметров токоограничителя цепи отключения междуфазного короткого замыкания:
TV3 – трансформатор питания схемы; TA1…TA4 – трансформаторы тока;
PA1 – амперметр; КМ1 – контактор пускателя; QF1 – контактная группа АВ (QF) А3792;
FA1…FA3 – расцепители максимального тока АВ; YAT – независимый расцепитель АВ;
FU1…FU2 – плавкие предохранители, БЗУ-ТП – блок защиты и управления КТП

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

При этом сигнал на срабатывание может быть сформирован как штатным устройством защиты (БЗУ-ТП), так и дополнительным специальным устройством, выполненным на основе измерения выходного сигнала встроенного датчика тока контактора. В связи с этим схема стенда (рис. 2) должна быть преобразована к виду, когда к выходу автоматического выключателя QF1 вместо плавких элементов предохранителей FU1, FU2, будет присоединѐн однополюсный вакуумный контактор (между двумя силовыми выводами QF1), включенный в исходном состоянии и отключаемый по команде блока БЗУ-ТП либо сигналом иной внешней максимальной токовой защиты. Фиксация измеряемых параметров в ходе экспериментов осуществляется цифровым осциллографом.

В ходе проведения экспериментов установлено, что наиболее характерными выявленными состояниями элементов защиты являются:

– отключение автоматического выключателя по сигналу БЗУ-ТП и целостность плавкого элемента;

– синхронное отключение автоматического выключателя по сигналу БЗУ-ТП и перегорание плавкого элемента;

– перегорание плавкого элемента за время, недостаточное для срабатывания БЗУ-ТП (рис. 3). Автоматический выключатель А3792У остается во включенном состоянии после перегорания плавких элементов в цепи нагрузки. Примеры осциллограмм токов в силовой цепи короткого замыкания приведены на рис. 3, рис. 4, результаты измерений – в табл. 1. Осциллографированием определены амплитуда тока, продолжительность КЗ до начала перегорания плавкого элемента (момент t_1), отключения силовой цепи.

При анализе результатов экспериментов учитывалось, что величина тока в цепи КЗ определяется величиной приложенного линейного напряжения (к шинам АВ), а также величиной сопротивления плавкого элемента (регулируется в зависимости от количества параллельно присоединенных плавких элементов).

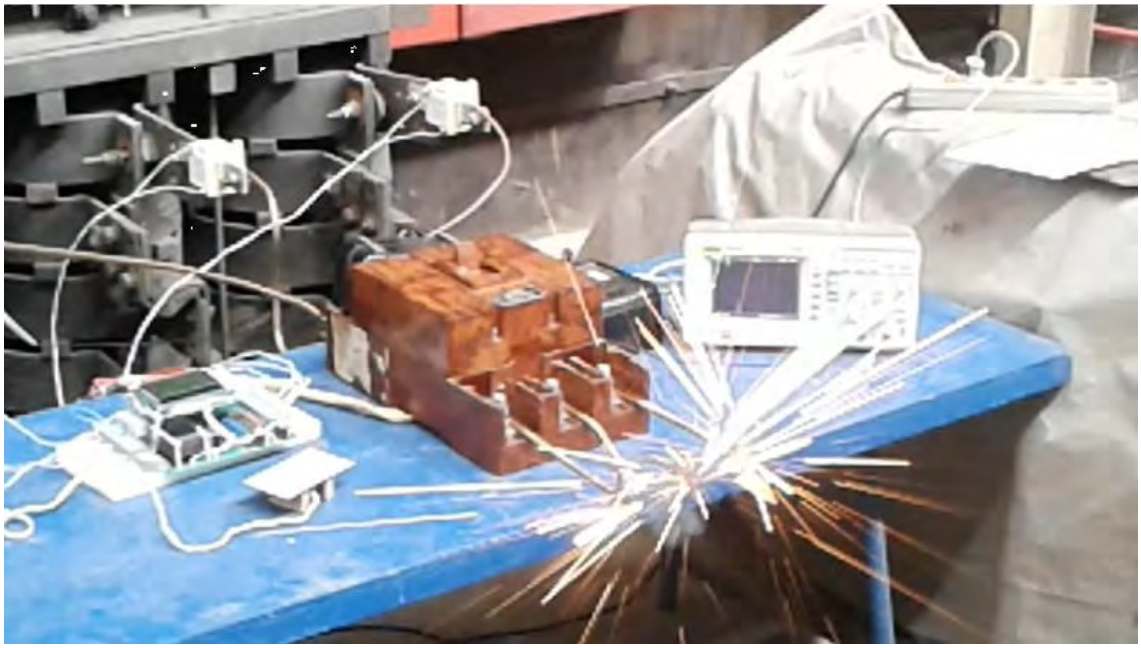
При этом в соответствии с техническими характеристиками общее время срабатывания МТЗ БЗУ-ТП составляет 0,07…0,10 с, включая 0,02…0,03 с – время реагирования БЗУ-ТП на ток КЗ и 0,05…0,07 с – собственное время отключения автоматического выключателя А3792У.

Табл. 1. Повторяющиеся параметры исследуемого объекта, зафиксированные в ходе экспериментов

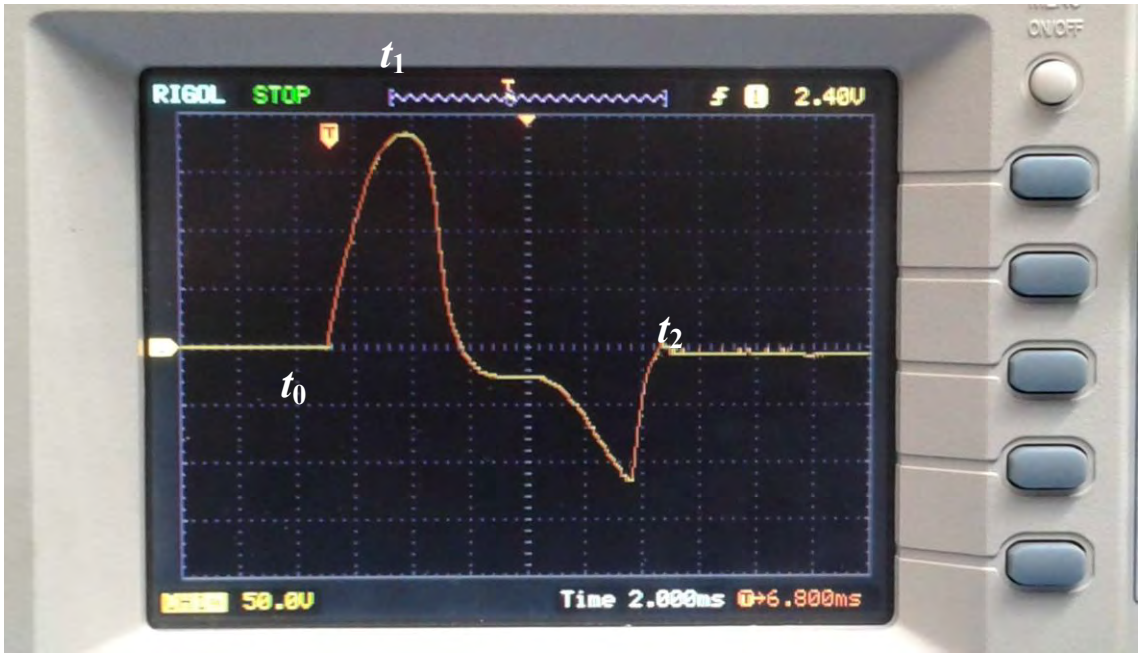
№ п/п	Напряжение линейное между шинами АВ, В	Ток уставки МТЗ типа БЗУ-ТП, А	Сечение медного плавкого элемента, мм^2	Длительный ток плавления плавкого элемента, А	Объекты, отключившие ток КЗ	Амплитуда тока, А (действующее значение тока А)	Продолжительность процесса до защитного отключения, с
1	2,0	501	3×0,52	180	АВ по команде БЗУ-ТП	537; (381)	0,306
2	5,0	501	3×0,52	180	АВ по команде БЗУ-ТП	1012; (718)	0,055
3	10,0	501	3×0,52	180	АВ по команде БЗУ-ТП	1898; (1346)	0,062
4	15,4	501	3×0,52	180	АВ по команде БЗУ-ТП и плавкий элемент	2538	0,049
5	20,1	501	3×0,52	180	АВ по команде БЗУ-ТП и плавкий элемент	3988	0,029 (Δt=0,014 с)
6	25,5	501	3×0,52	180	Плавкий элемент	4292	0,0059 (Δt=0,0015 с)
7	2,6	600	2×0,52	120	АВ по команде БЗУ-ТП	631; (448)	0,078
8	2,6	700	2×0,52	120	АВ по команде БЗУ-ТП	637; (452)	0,104
9	2,6	750	2×0,52	120	Плавкий элемент	634; (450)	0,387
10	12,6	750	2×0,52	120	АВ по команде БЗУ-ТП и плавкий элемент	2043; (1449)	0,046
11	12,6	750	1×0,52	60	Плавкий элемент	1645; (1167)	0,041 (Δt=0,027 с)
12	12,6	501	1×0,52	60	Плавкий элемент	1240; (879)	0,022 (Δt=0,016 с)
13	24,0	501	1×0,52	60	Плавкий элемент	1786; (1267)	0,0086 (Δt=0,0045 с)

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

В табл. 1 параметр Δt – интервал времени между началом КЗ и зафиксированным моментом начала плавления плавкого элемента предохранителя. Нелинейная зависимость времени срабатывания плавкого элемента от соотношения величины тока в защищаемой цепи к току плавления ($\lambda=i_{к.з.}/i_{пл}$) в полной мере выявлена в ходе выполнения экспериментов (сопоставление строк 1. 6, 9, 13 табл. 1) и позволяет утверждать, что с увеличением данного соотношения продолжительность срабатывания (перегорания) плавкого элемента будет значительно меньшей, чем продолжительность реакции на КЗ МТЗ БЗУ-ТП и, тем более, последующего отключения автоматического выключателя.



а



б

Рис. 3: Ток в силовой цепи короткого замыкания:
а – фиксация момента перегорания плавких элементов в цепи трехфазного КЗ на выходе автоматического выключателя за время, меньшее продолжительности реагирования на короткое замыкание БЗУ-ТП и расцепителей АВ;
б – осциллограмма тока в цепи короткого замыкания, уставка БЗУ-ТП – 501 А; $U_л$=25,5 В; $S_{пр}$=3×0,52 мм^2, амплитуда тока 4292 А; срабатывание предохранителя без отключения автоматического выключателя – продолжительность процесса 0,0059 с

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org



а б

Рис. 4. Осциллограммы тока в цепи короткого замыкания:
а – уставка БЗУ-ТП, 501 А; $U_л$=24,0 В; $S_{пр}$=1×0,52мм^2;
б – уставка БЗУ-ТП, 750 А; $U_л$= 12,6 В; $S_{пр}$=1×0,52 мм^2;
в обоих случаях срабатывание предохранителя без отключения АВ

Это подтверждается результатами, представленными в строках 6, 11…13 табл. 1 и на осциллограммах (рис. 3б, рис. 4а,б).

Выявленный эффект синхронного срабатывания плавкого элемента и штатной МТЗ подтверждает теоретическую возможность повышения коммутационного ресурса автоматического выключателя, при этом при высоких значениях λ срабатывание плавкого элемента опередит реакцию на ток КЗ со стороны максимальной токовой защиты БЗУ-ТП, что не приведет к отключению под нагрузкой автоматического выключателя, т. е. обеспечит полное сохранение его коммутационного ресурса. Указанные соображения должны быть учтены при выборе предохранителя в процессе практической (в условиях промышленности) реализации устройства энергетического ограничения в цепи отключения междуфазного тока в присоединении трансформаторной подстанции.

Фактором, ограничивающим параметр λ, в данном случае выступает показатель суммарного тока двигателей потребителей технологического участка, включая пусковой ток потребителя максимальной мощности. С увеличением мощности потребителей расчетный параметр λ должен быть уменьшен, что переведет продолжительность срабатывания плавких элементов во временной диапазон, сопоставимый с продолжительностью срабатывания штатных МТЗ (БЗУ-ТП) КТП. Однако положительный эффект применения данного технического решения очевиден, зафиксирована возможность 2…13-кратного сокращения продолжительности отключения КЗ в сравнении с быстродействием штатных устройств защитного отключения и ограничения энергетических показателей процесса.

С целью выявления возможности использования вакуумного контактора в качестве дополнительного устройства ускоренного автоматического разрыва цепи коммутации тока КЗ исследована схема, где в качестве вакуумного элемента КМ2 был применен контактор типа SPVC 1-630 с паспортными параметрами – максимальный ток: включения – 30 кА; отключения – 12 кА, время отключения 7±2 мс (рис. 5).

Первоначально цепь отключения вакуумного контактора была связана с выходом максимальной токовой защиты БЗУ-ТП, что позволило выявить фактическую продолжительность отключения тока этим контактором, сопоставимую с параметрами быстродействия автоматического выключателя А3792У при его срабатывания по команде той же МТЗ БЗУ-ТП. Измеренные параметры представлены, в частности, на рис. 6.

Кроме того, в ходе экспериментов при коммутации цепи КЗ с током 722 А (действующее значение) был зафиксирован отказ вакуумного контактора SPVC 1-630, выразившийся в спекании между собой силовых контактов и их механическом отделении от перемещающегося якоря электромагнита. Таким образом, при управлении (включение/отключение) контактором его якорь электромагнита перемещался в штатном режиме, слаботочный блок-контакт также штатно переключался, в то время как рабочие (силовые) контакты постоянно оставались соединенными.

Это дает основания считать недостаточным уровень достоверности информации о состоянии силовых контактов вакуумного контактора, формируемой коммутацией его слаботочного блок-контакта. Это представляет практическую актуальность в контексте эксплуатации вакуумных контакторов.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

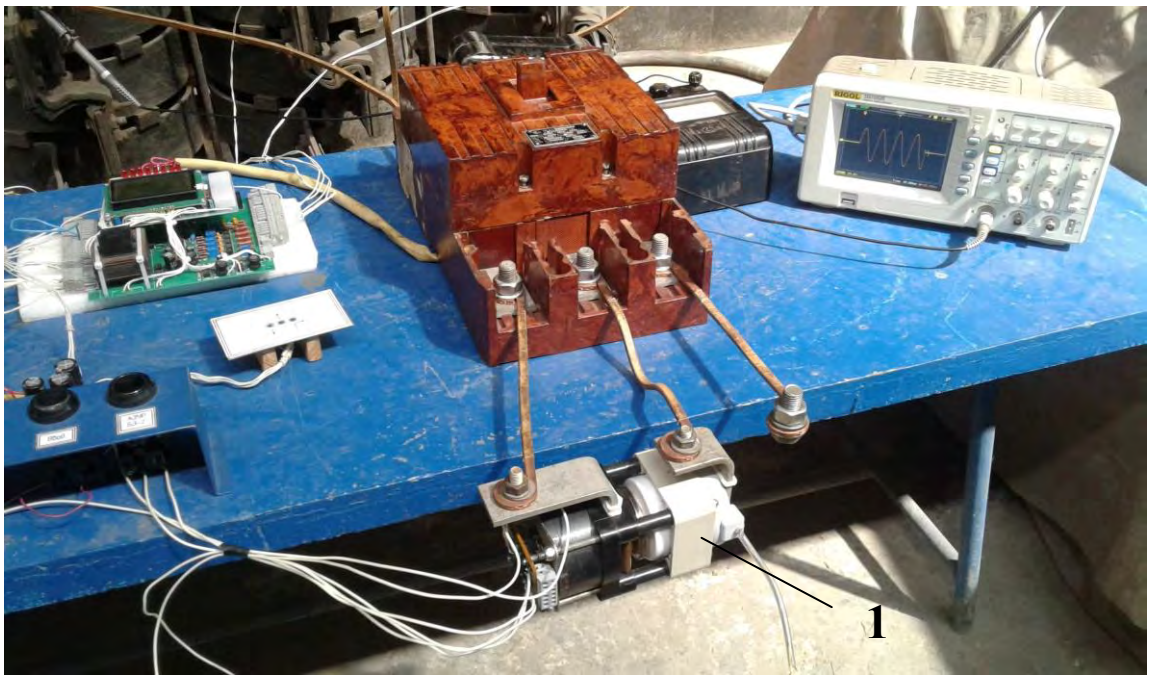


Рис. 5. Фиксация срабатывания внешней максимальной токовой защиты БЗУ-ТП с воздействием на независимый расцепитель АВ при исследовании функциональных свойств контактора типа SPVC 1-630 применительно к его использованию в качестве дополнительного коммутационного элемента отключения цепи короткого замыкания: *1* – контактор SPVC 1-630; БЗУ-ТП – 501 А; ток цепи КЗ, действующее значение, – 722 А

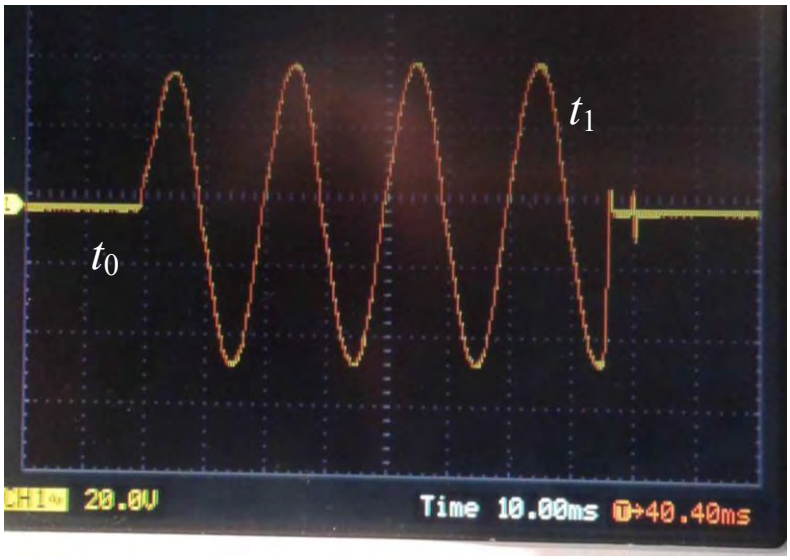


Рис. 6. Осциллограмма тока в цепи короткого замыкания при исследовании схемы стенда по рис. 5: уставка БЗУ-ТП – 501 А; $U_л$=4,5 В; I_m=1018 А, срабатывание автоматического выключателя А3792 по команде блока БЗУ-ТП, сопровождаемое «спеканием» силовых контактов вакуумного контактора SPVC1-630

Ввиду невыявления фактических параметров быстродействия устройства ограничения продолжительности КЗ, выполненного на основе применения однополюсного вакуумного контактора (функционирующего совместно с защитой БЗУ-ТП), превышающих скорость защитного отключения КЗ автоматическим выключателем А3792У (по команде этой же защиты), представляется целесообразным при разработке технических решений с использованием данного контактора использовать его паспортные технические характеристики и увязывать его работу с устройствами МТЗ более высокого быстродействия.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Выводы

Исследованиями установлена возможность ускоренного автоматического разъединения цепи короткого замыкания силового присоединения, отходящего от комплектной трансформаторной подстанции участка шахты, техническими средствами, разрывающими цепь соединения в «звезду». В устройства реализации данной функции может быть принят мостовой выпрямитель, подключенный входами к вторичным обмоткам трансформатора и нагруженный предохранителем. В этом случае установлена возможность срабатывания предохранителя (в случае возникновения КЗ) за время, существенно меньшее продолжительности срабатывания (выявления КЗ и отключения) штатных средств максимальной токовой защиты либо сопоставимое с данным параметром. Это подтверждает предположение о возможности ограничения энергетических показателей плазмо-, дугообразования в силовых контактных группах автоматического выключателя А3792У КТП, что обеспечивает существенное повышение его ресурса.

Использование вакуумного контактора (вместо предохранителя) в цепи нагрузки мостового выпрямителя также создает эффект дополнительного разрыва цепи КЗ, однако отличается инерционностью, обусловленной продолжительностью выявления КЗ устройством максимальной токовой защиты и собственным временем срабатывания. Кроме этого, в отношении эксплуатации вакуумного контактора установлена некорректность фиксации его состояния по положению слаботочного контакта (используемого в схемах управления и сигнализации), поскольку в результате возможного отказа (в виде отделения якоря магнитопровода от силовых контактов в результате их спекания между собой) положение слаботочного контакта не будет соответствовать состоянию силовой контактной группы.

Список литературы

1. Berryann, R.J. Evolution of Longwall Mining and Control Systems in the United States [Electronic resource] / R.J. Berryann, J.A. Voelker // Mine Safety and Health Administration, Division of Electric Safety. – Triadelphia, West Virginia, 2005. – Mode of access: WWW.URL: www.msha.gov/s&hinfo/techrpt/electrical/lwcntrl.pdf
2. Groh, H. Explosion protection: electrical apparatus and systems for chemical plants, oil and gas industry, coal mining / H. Groh. – Amsterdam; London: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. – 524 p.
3. Маренич, О.К. Элементы конструкции автоматического выключателя А37ХХ как фактор возникновения его потенциально опасного состояния / О.К. Маренич, И.В. Ковалѐва // Вестник ДонНТУ. – 2018. – №4. – С. 47-52.
4. Лелѐвкин, В.М. Численное моделирование характеристик открытой диафрагмированной электрической дуги / В.М. Лелѐвкин, В.Ф. Семѐнов // Вестник КРСУ. – 2002. – №22. – С. 25-34.
5. Брон, О.Б. Потоки плазмы в электрической дуге выключающих аппаратов / О.Б. Брон, Л.К. Сушков. – Ленинград: Энергия, 1975. – 211 с.
6. Elkalashy, N.I. Modeling and Detection of High Impedance Arcing Fault in Medium Voltage Networks. – Helsinki: Helsinki University of Technology, 2007. – 77 p.
7. Ковалѐва, И.В. Техническая реализация токоограничения цепи короткого замыкания в контексте применения вакуумных коммутаторов / И.В. Ковалѐва, О.К. Маренич // Вестник ДонНТУ. – 2018. – №1. – С. 34-40.
8. Блок защиты и управления трансформаторной подстанции БЗУ-ТП. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – 2016. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://itep.com.ua/ru/catalogue/systems/bzu-tp/

O.K. Marenich
Donetsk National Technical University (Donetsk)
Ye.V. Zolotaryov
Research, Project, Designing and Technological Institute of Explosion-Proof and Mining Electrical Equipment (Donetsk)

THE USE OF ADDITIONAL AUTOMATIC CIRCUIT BREAK FACILITIES FOR SHORT CIRCUIT CURRENT AS A MEANS OF IMPROVING THE CIRCUIT BREAKER RESOURCE OF A MINE TRANSFORMER SUBSTATION

Background. *The A3792U circuit breaker is known as a reliable switching device used in the electrical complex of the mine section at a voltage of 660 V. It can also be used in a network with a voltage of 1140 V. However, there are cases when after switching off ultra-high short-circuit currents inside the circuit breaker there is an interphase conductivity which causes damage. The above*

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

mentioned necessitates the development of a device to limit the current in the power circuit of the circuit breaker when switching off ultra-high short-circuit currents. Experimental studies of such a device are relevant.

Materials and/or methods. *Developed the experimental rig and the empirical study carried out of the conceptual schemes which limit the energy performance of plasma formation in power contact groups of the A3792U circuit breaker of mine transformer substation when disabling phase-to-phase short circuits. The data on the operating parameters of devices that limit the duration of short circuits in the electrical network, which branches off from the transformer substation obtained. The corresponding waveforms and measurement results presented.*

Results. *Proved that the device for limiting the duration of the short circuit based on the use of a fuse has a speed sufficient to reduce the required thermal load of the power contact groups of the A3792U automatic switch of the transformer substation. The vacuum contactor used instead of a fuse creates the effect of an additional break of the short circuit but with a lower speed.*

Conclusion. *The assumptions about the possibility of increasing the life of the circuit breaker based on the use of additional high-speed devices limiting the duration of the short circuit current in the process of its protective shutdown are confirmed. The revealed operation parameters of the device for limiting short circuit duration, based on the use of a fuse for breaking the three-phase circuit of the transformer windings of the substation, give grounds for its use in industry.*

Keywords: *electrical complex, transformer substation, circuit breaker, short circuit, electric arc, resource, accelerated deenergizing, circuit, experimental studies, analysis.*

Сведения об авторах

О.К. Маренич
SPIN-код: 3950-0577
Телефон: +380 (71) 317-32-09
Эл. почта: marenich13@gmail.com

Е.В. Золотарёв
Телефон: +380 (71) 412-10-54
Эл. почта: transformator76@inbox.ru

Статья поступила 19.07.2019 г.
© О.К. Маренич, Е.В. Золотарёв, 2019
Рецензент д.т.н., доц. И.А. Бершадский



ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

УДК 669.056

А.А. Троянский /д.т.н./, В.И. Заика /к.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)
А.Д. Рябцев /д.т.н./
ПАО «Русполимет» (Кулебаки, Россия)

ПРОТИВОФЛОКЕННАЯ ТЕРМООБРАБОТКА ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА

Рассмотрены вопросы организации оптимальных режимов термообработки заготовок электрошлакового переплава (ЭШП) в условиях машиностроительного предприятия для предотвращения дефектов, вызванных присутствием водорода в металле. Показано, что изменением в сторону увеличения скорости нагрева и охлаждения в процессе термообработки можно существенно, до 2,5 раза, уменьшать содержание водорода в литом электрошлаковом металле и сокращать энергетические затраты.

Ключевые слова: *отливки ЭШП, водород, флокены, термообработка, растворимость водорода, напряжения.*

Постановка проблемы

Известно, что водород, присутствующий в стали в качестве вредной примеси, негативно влияет на ее эксплуатационные свойства и вызывает образование специфических дефектов [1]. Находясь в жидком расплаве в виде ионов, водород в процессе кристаллизации металла переходит в атомарное состояние [2,3], растворяется в железе и его сплавах, взаимодействует с дефектами кристаллической решетки [4,5] и приводит к необратимым разрушениям металла – флокенам. Кроме того, наличие водорода в сталях способствует образованию пористости, снижению уровня механических свойств в металле и, как следствие, ресурса долговечности и работоспособности металлических изделий. Водород приводит металлы и сплавы в неравновесное состояние [6,7], и возникает термодинамическая необходимость фазовых и структурных превращений, обеспечивающих их движение к термодинамическому равновесному состоянию. Вредное воздействие водорода на свойства стали, в частности явление водородного охрупчивания, тем сильнее, чем прочнее сталь. Особенно этим страдают хромоникелевые конструкционные стали [8,9].

Источниками поступления водорода в сталь являются шихтовые материалы, печная атмосфера и различные присадки в металлическую ванну. Но определяющими содержание водорода в жидком металле являются технологические особенности плавки [10].

В практике современного массового производства стали на металлургических предприятиях удается в значительной мере снять проблему водорода за счет исключения из технологических циклов восстановительных операций и использования внепечной, особенно вакуумной, обработки металла. В то же время на машиностроительных предприятиях, обладающих собственной металлургической базой, сделать это крайне сложно. Используемое в их парке металлургическое оборудование – электродуговые, индукционные и электрошлаковые печи, является агрегатами открытого типа, работающими по классической технологии. В этих условиях практически единственным способом борьбы с водородом в металле является специальный вид термической обработки – отжиг [11,12].

Анализ последних исследований и публикаций

Как показали исследования, в ряде случаев отжиг малоэффективен и не всегда обеспечивает отсутствие флокенов в металле [12,13], и связано это со следующим:

– повышение температуры отжига увеличивает растворимость водорода в металле и снижает степень его десорбции из отливок;

– отжиг снижает общий уровень внутренних напряжений в металле как одного из основных факторов флокенообразования, но практически не способствует перераспределению водорода по сечению отливок;

– отжиг является довольно энергозатратной технологической операцией.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является разработка альтернативного классическому отжигу варианта противофлокенной термической обработки

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

электрометаллургических отливок из стали 40ХН, обеспечивающего снижение содержания водорода и гарантированное качество металла.

Основной материал исследования

Сталь марки 40ХН электродуговой и электрошлаковой выплавки используют в машиностроительной практике для изготовления специальной оснастки и деталей, работающих в условиях высоких вибрационных и динамических нагрузок.

Разрабатывая новый режим противофлокенной термической обработки, исходили из следующих положений:

– полиморфное $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение способствует выделению водорода из металла;

– нагрев отливки должен производиться с такой скоростью, чтобы обеспечить ощутимый по времени перегрев поверхности заготовки относительно ее сердцевины. В этих условиях растворимость водорода в перегретых слоях увеличивается, из-за чего он будет диффундировать из объема заготовки к ее поверхности;

– согласно термокинетическим диаграммам распада переохлажденного аустенита [14] полное превращение его в перлит, необходимое для снижения вероятности образования флокенов, должно произойти за время, соответствующее выбранным скоростям охлаждения.

Экспериментальные исследования проводили в условиях машиностроительного завода. Производство заготовок из стали 40ХН на предприятии организовано по следующим технологическим операциям, регламентированным заводскими инструкциями.

Исходную сталь марки 40ХН выплавляли в индукционных печах ИСТ-0,4 и разливали в расходуемые электроды, которые электрошлаковым способом переплавляли на установке ЭШП-4П в медный водоохлаждаемый кристаллизатор диаметром 245 мм. Слитки ЭШП после противофлокенной термообработки подвергали пластической деформации – проковке и последующей прокатке. Из полученных таким образом заготовок изготавливали валы для сельскохозяйственных машин.

Ряд слитков ЭШП были изъяты из технологического процесса для исследования режимов противофлокенной термообработки. От них отбирали заготовки длиной 200 мм, удаляя головные и донные части на анодно-механическом станке. Эти заготовки после каждого этапа термообработки охлаждали и из них на глубине 15 и 120 мм от поверхности отбирали пробы для последующего определения в них содержания водорода на приборе ЕА-1 фирмы «Бальцерс». Отбор проб осуществляли полым сверлом из быстрорежущей стали Р18 [15] на вертикально-фрезерном станке при предельно допустимых минимальных скоростях вращения, обильно охлаждая эмульсией засверливаемые участки. Пробы помещали в термостат с твердой углекислотой.

Опытные заготовки нагревали в термопечах. Предварительно печи разогревали до выбранных температур и помещали в них заготовки, изменяя, таким образом, скорость их нагрева.

Охлаждение заготовок до заданных температур осуществляли сжатым воздухом в специально разработанном для этих целей устройстве камерного типа.

Температуру фиксировали хромель-алюмелевыми термопарами, внедренными на глубину 15 мм от поверхности и в центр заготовок.

В табл. 1 представлено содержание водорода в отливках ЭШП из стали 40ХН после традиционного отжига и после каждого из этапов предлагаемой термообработки.

Табл. 1. Изменение содержания водорода по сечению отливок стали ЭШП марки 40ХН диаметром 245 мм

№ п/п	Режимы термообработки отливок	Содержание водорода, H_2, %		Среднее содержание водорода H_2, %
		Расстояние от поверхности, мм		
		15	120	
1	После ЭШП (эталонная заготовка)	0,00045	0,00060	0,00052
2	Отжиг 873К, 10 ч (существующий режим)	0,00030	0,00055	0,00042
3	Нагрев до 1133К со скоростью 7…11 К/мин	0,00037	0,00050	0,00043
4	Выдержка при 1133К, 2 ч	0,00035	0,00050	0,00042
5	Охлаждение от 1133 до 953К со скоростью 8…10 К/мин	0,00025	0,00038	0,00031
6	Выдержка при 953К, 2 ч	0,00020	0,00030	0,00025
7	Охлаждение от 953 до 573К со скоростью 8…10 К/мин	0,00010	0,00025	0,00017
8	Выдержка при 573К в течение 1,5 ч с последующим охлаждением на воздухе	0,00010	0,00025	0,00017

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Как видно, предложенный режим противофлокенной термообработки, предусматривающий ускоренные нагрев и охлаждение отливок, позволяет существенно, в 2,5 раза, снизить содержание водорода в литом металле ЭШП и сократить длительность этой технологической операции. Примечательно, что при рассмотренных режимах нагрева и охлаждения водород в приповерхностном слое (глубиной 15 мм) не только не накапливается из-за перераспределения его между сердцевиной и поверхностью заготовок, а и значительно уменьшается.

Практика эксплуатации валов сельскохозяйственных машин, изготовленных из стали 40ХН ЭШП, заготовки которой термообработаны по исследованному режиму, показала существенное увеличение их рабочих характеристик и долговечности.

Новый режим противофлокенной термообработки внедрен в производство.

Выводы

Как показали выполненные исследования, варьированием скорости нагрева и охлаждения термообрабатываемых литых заготовок можно существенно влиять на диффузию и перераспределение водорода в металле и использовать это как инструмент борьбы с водородом.

Список литературы

1. Колачѐв, Б.А. Водородная хрупкость металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1985. – 217 с.
2. Aydin, U. Solution Enthalpy of Hydrogen in Fourth Row Elements: Systematic Trends Derived from First Principles / U. Aydin, L. Ismer, J. Neugebauer // Physical Review B. – 2012. – No.15. Vol.85. – P. 144-155.
3. Blachowski. A. Transition Metal Impurity Effect on Charge and Spin Density in Iron: Ab Initio Calculations and Comparison with Mössbauer Data / A. Blachowski, U.D. Wdowik // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 2012. – No.2. Vol.73. – P. 317-323.
4. Сошко, В.А. Водородная хрупкость и водородная пластичность стали / В.А. Сошко, И.П. Симинченко, В.С. Ляшко // Металлофизика и новейшие технологии. – 2014. – №12. Т.36. – С. 170-171.
5. The effect of diffusion-mobile and combined hydrogen of hydrogen brittleness of steel / L.V. Shaskova et al. // Industrial laboratory. Diagnostics of materials. – 2019. – No.8. – P. 59-66.
6. Гольцов, В.А. Фундаментальные основы водородной обработки материалов // Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – №1. – С. 42-69.
7. Мирзаев, Д.А. Влияние легирования на термодинамические характеристики водорода в ОЦХ-железе /Д.А. Мирзаев, А.А.Мирзоев, М.С.Ракитин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – Челябинск, 2016. – С. 40-51.
8. Гарилюк, В.Г. Углерод, азот и водород в сталях. Пластичность и хрупкость //Известия высших учебных заведений. Чѐрная металлургия. – 2015. – №10. – С. 761-768.
9. Охрупчивание конструкционных сталей и сплавов / Пер. с. англ. // Под ред. К.Л. Брайента, С.К. Бенерджи. – М.: Металлургия, 1988. – 552 с.
10. Кудрин, В.А. Теория и технология производства стали: Учебник для вузов. – М.: Мир, ООО «Изд-во АСТ», 2003. – 528 с.
11. Термическая обработка крупных поковок / Ю.А. Башнин и др. – М.: Металлургия, 1973. – 175 с.
12. Глебов, А.Г. Электрошлаковый переплав /А.Г. Глебов, Е.И. Мошкевич. – М.: Металлургия, 2010. – 343 с.
13. Тазетдинов, Р.Г. Физико-химические основы технологических процессов производства и обработки конструкционных материалов: Учебное пособие. – 2-е изд., доп. и испр. – М.: Металлургия, 1987. – 161 с.
14. Попов, А.А. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита /А.А. Попов, Л.Е. Попова.– М.: Металлургия, 1965. – 495 с.
15. Шаповалов, В.И. Флокены и контроль водорода в стали / В.И. Шаповалов, В.В. Трофименко. – М.: Металлургия, 1987. – 161 с.

O.A. Troyanskiy /Dr. Sci. (Eng.)/, V.I. Zaika /Cand. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)
A.D. Ryabtsev /Dr. Sci. (Eng.)/
PJSC «Ruspolimet» (Kulebaki, Russia)

ANTI-FLAKE HEAT TREATMENT OF CAST BILLETS OF ELECTROSLAG REMELTING

Background. *The problem of extra-aggregate removal of hydrogen from ingots and castings produced*

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

at machine-building enterprises remains relevant due to the peculiarities of their metallurgical equipment base. In the ingots of most structural steels, after slow cooling, the formation of flakes is possible (irreversible defect in the metal). The maximum permissible ingots exposure time was set to reduce the risk of flakes formation during annealing, which reduces the level of internal stresses and the hydrogen content in the metal. However, the low efficiency of annealing is due to the difficulty of redistributing hydrogen in the cross-section of castings. The latter, combined with residual stresses cause the appearance of flakes. For this reason, the task of developing a method of heat treatment, which allows not only to reduce the total hydrogen content in the surface layers but also to activate its movement from the central zones to the surface with subsequent evacuation from the metal.

Materials and/or methods. *We have investigated 40XH steel of electric-arc and electroslag smelting used for the production of specialised equipment working in the conditions of high vibration and dynamic loadings. 40XH steel smelted in an induction furnace and poured into consumable electrodes further remelted at the ESR installation into a crystalliser of 245 mm diameter. Shafts for agricultural machines made from the obtained billets after heat treatment. In the process of developing a new method of heat treatment, experimental billets heated in thermal furnaces and after exposure cooled in chamber-type installations. The total hydrogen content in ESR billets after various stages of heat treatment and its content at a distance of 15 and 120 mm from the surface were estimated.*

Results. *The variation rate of heating and cooling ESR billets allowed choosing the optimal heat treatment modes, which reduce the hydrogen content by 2.5 times compared with traditional annealing and reducing the time of treatment.*

Conclusion. *Shown that variation of the rate of heating and cooling of heat-treated castings can significantly affect the diffusion and redistribution of hydrogen in the metal and its use as a tool to combat hydrogen.*

Keywords: *ESR billets, hydrogen, flakes, heat treatment, hydrogen solubility, tension.*

Сведения об авторах

А.А. Троянский
SPIN-код: 5708-7912
Телефон: +380 (71) 301-98-60
Эл. почта: taa@donntu.org

В.И. Заика
Телефон: +380 (71) 420-29-67
Эл. почта: v.i.zaika@list.ru

А.Д. Рябцев
Телефон: +380 (62) 301-08-17
Эл. почта: emkaf@tmt.donntu.org

Статья поступила 03.10.2019 г.
© А.А. Троянский, А.Д. Рябцев, В.И. Заика, 2019
Рецензент д.т.н., проф. А.Б. Бирюков



УДК 662.7:552.57

В.Н. Шевкопляс /к.х.н./
ГУ «Институт физико-органической химии и углехимии» (Донецк)
Л.Ф. Бутузова /д.х.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)
В.А. Колбаса, Г.Н. Бутузов /к.х.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ДЕРИВАТОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УГЛЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И УГЛЕЙ РЯДА МЕТАМОРФИЗМА

Приведены данные дериватографических исследований углеобразователей (C^{daf}=44,3…59,0 %) и углей разных стадий углефикации (C^{daf}=62,4…93,7 %) в интервале температур 20…950 °С. Детально изучен интервал основного термического разложения твердых топлив, соответствующий температурному интервалу полукоксования, рассчитаны основные его параметры: протяженность ($T_н…T_к$), температура максимума (T_{max}), величина эффективной энергии активации процесса газовыделения ($E_{акт}$), скорость потери массы ($V_{\Delta m}$) и порядок реакции. Установлено, что температура максимума эндоэффекта основного разложения на дериватограмме (T_{max}) является важнейшим показателем качества конкретного образца топлива, который должен использоваться в качестве конечной температуры в условиях стандартного полукоксования.

Ключевые слова: *углеобразователи, угли ряда метаморфизма, дериватография, потеря массы, эффективная энергия активации, температура $T_{max.}$*

Постановка проблемы

В настоящее время в углехимии накоплена обширная информация о составе, свойствах, структуре углей и их поведении при нагревании. Опубликован ряд работ, направленных на выявление основных закономерностей термодеструкции органической массы углей (ОМУ) с учетом влияния условий процесса на ход термических превращений.

Однако в литературе недостаточно информации, отражающей взаимосвязь между структурой исходных углей, их термической стабильностью и технологическими характеристиками, такими как выход и состав продуктов пиролиза, способность к спеканию и коксованию и др.

Практически отсутствуют данные, показывающие поведение при термодеструкции в идентичных условиях полного ряда твердых топлив (ТТ) разных стадий углефикации, с включением в этот перечень прекурсоров углей (лигнин, торф, древесина, целлюлоза). Являясь исходным материалом для образования гумусовых углей, углеобразователи несут обширную первоначальную информацию о структурных преобразованиях конкретного угля, что позволяет не только правильно расположить его в ряду метаморфизма, но и связать его структурные особенности с поведением в различных технологических процессах.

Актуальной остается проблема исследования структурно-химических характеристик твердых продуктов пиролиза углей, полученных при различных температурах. Содержащиеся в литературе сведения не дают однозначного ответа на вопрос о механизме структурной перестройки ОМУ при нагревании.

Данное направление в углехимии является весьма перспективным, так как создает обоснованные предпосылки для разработки новых технологий переработки твердых горючих ископаемых и целенаправленного получения продуктов различного агрегатного состояния и назначения.

Анализ последних исследований и публикаций

Известно, что термическая деструкция углей протекает с образованием смолы, пирогенетической воды, газов и твердого остатка, количественная и качественная характеристика которых может быть использована для получения объективной информации о составе и свойствах исходных углей.

В свою очередь, выход и состав продуктов термодеструкции определяется стадией метаморфизма, петрографическим составом, типом по восстановленности угля и зависит от технологических параметров процесса (температура, скорость нагревания, время изотермической выдержки, фракционный состав твердого топлива, давление и ряд других факторов).

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Настоящее исследование выполнено в привязке к стандартному методу определения выхода продуктов полукоксования (ГОСТ 3168-93, ИСО 647-74), который предусматривает термическое разложение топлив при конечной температуре 550 °С без доступа воздуха с образованием пирогенетической воды, смолы, газа и полукокса [1]. Выход продуктов полукоксования является одним из классификационных параметров, который широко применяется в промышленности для оценки технологических характеристик углей [2…4].

Основной недостаток данного метода – фиксированная температура проведения пиролиза для всех углей, которая, по данным дериватографии, не всегда соответствует максимальной температуре (T_{max}) основного разложения органической массы на кривой ДТГ. Для бурых и длиннопламенных углей эта температура значительно завышена (потеря массы до 50 %), а для углей марки Т и антрацитов занижена – до 10 % .

Следовательно, данный метод предназначен главным образом для оценки технологических характеристик углей средней стадии метаморфизма с содержанием углерода (C^{daf}=83,0...89,0 %) и не может быть распространен на весь ряд метаморфизма.

Важно отметить, что первичные продукты пиролиза легко вступают в реакции конденсации, полимеризации, изомеризации и другие, превращаясь во вторичные продукты, состав и свойства которых в большой степени зависят от условий проведения процесса. Следовательно, чрезвычайно важно провести процесс пиролиза в мягких условиях, не допускающих протекание вторичных превращений продуктов разложения, как это имеет место при полукоксовании и коксовании.

Кроме того, метод полукоксования до настоящего времени не использовался для сравнительной оценки свойств углей и углеобразователей – целлюлозы, лигнина, древесины и торфа. В то же время вопрос об участии отдельных компонентов исходного растительного материала в углеобразовании остается одним из наиболее сложных и дискуссионных в углехимии.

Исходя из вышеизложенного, конечная температура термодеструкции топлива должна быть индивидуально подобрана для каждого исследуемого образца таким образом, чтобы при проведении пиролиза исключить или минимизировать влияние реакций вторичной деструкции и конденсации. Метод дериватографии дает возможность определить искомую температуру. По виду дериватограмм (кривые ДТА, ДТГ и ТГ) можно проследить за ходом термодеструкции топлива в интервале температур от 20 до 950 °С, охарактеризовать процессы, протекающие в том или ином температурном интервале, определить значение T_{max} для каждого конкретного образца с учетом его элементного состава.

Новая информация о химическом составе и строении углеобразователей в совокупности с данными анализа продуктов их термодеструкции может дать определенные сведения о путях трансформации исходного материнского органического материала на стадии диагенеза и метаморфизма.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является определение характеристических параметров процесса термической деструкции полного ряда природных твердых топлив (углеобразователей и углей) в строго идентичных условиях нагрева в широком интервале температур – 20…950 °С и установление взаимосвязей между положением топлива в ряду углефикации, их составом и свойствами.

Основной материал исследования

Для исследований были использованы углеобразователи и угли разной степени углефикации (бурые, каменные и антрациты) различных месторождений. Технический и элементный анализ исследуемых углей был проведен по стандартным методикам, согласно существующим классификациям [5,6]. Характеристика изученных образцов приведена в табл. 1.

Метод дериватографии основан на непрерывном измерении потери веса образцом исследуемого материала при воздействии на него теплового потока при линейно повышающемся значении температуры. Одновременно производится регистрация тепловых эффектов процесса разложения [7,8].

В настоящей работе исследование углей проводили в дериватографе Q1500D системы Паулик-Паулик-Эрдеи в атмосфере инертного газа (аргона), с использованием платинового тигля с крышкой. Скорость нагрева составила 10 °С/мин, навеска угля – 500 мг.

По анализу кривой ДТА устанавливали характер протекания процесса термодеструкции – с выделением или поглощением теплоты. Одновременно определяли значение температуры максимума основного разложения на кривой ДТА. Расчет потери массы проводили в упомянутой области температур, приняв за начальную температуру 200 °С, а за конечную – 950 °С. По кривой ТГ определяли потерю массы угля (Δm) в миллиграммах и процентах от исходной навески.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Табл. 1. Характеристика углеобразователей и углей ряда метаморфизма

№ п/п	Образцы	Технический анализ, %				Элементный состав, (daf), %		
		W^a	A^d	S^d_t	V^{daf}	C	H	O+N
1	Целлюлоза	5,8	0,1	0,1	75,0	44,3	6,4	49,3
2	Древесина (хв.)	7,4	0,7	0,1	71,5	51,6	4,9	43,5
3	Древесина (лист.)	7,1	0,5	0,1	74,8	52,8	6,4	40,8
4	Торф (укр.)	61,7	43,9	0,3	70,0	57,0	6,0	36,0
5	Торф (прибалт.)	3,4	77,7	0,3	70,0	57,0	6,0	36,0
6	Лигнин	4,6	5,2	0,1	71,0	59,0	6,2	35,0
7	Б	55,6	35,4	2,7	61,3	62,4	5,1	27,6
8	Б	60,1	52,9	2,7	55,4	64,1	5,0	28,2
9	Б	42,0	25,2	2,9	63,2	65,4	6,1	28,5
10	Б	47,4	10,1	4,1	61,0	66,8	5,8	27,4
11	Б	48,7	19,6	4,3	59,6	69,6	6,0	18,9
12	Б	51,0	4,8	3,4	59,1	71,0	4,8	21,1
13	Б	13,1	5,8	0,2	45,2	74,3	4,9	20,5
14	Д, l_4	1,4	3,2	3,2	41,0	76,6	5,6	14,6
15	Д, l_2	1,9	5,1	5,6	43,0	76,2	5,2	13,0
16	Д, l_4	3,0	7,2	1,0	37,0	79,0	5,1	14,9
17	Г, l_3	1,6	4,6	2,3	38,0	82,2	5,4	10,9
18	Г, l_1	1,2	3,1	1,0	35,0	82,7	5,3	11,0
19	Г, k_5	2,1	1,5	0,7	35,4	83,5	5,4	10,4
20	Г, m_3	1,3	2,5	3,1	35,5	84,3	5,3	7,3
21	Ж k_8	0,9	2,6	4,1	30,5	85,4	5,2	5,3
22	Ж, l_1	1,3	8,2	1,1	32,7	86,1	5,4	7,4
23	Ж, m_2	1,6	15,2	1,2	29,5	87,4	5,3	6,1
24	К, k_8	2,8	8,3	3,0	22,4	88,6	4,8	3,6
25	ОС, l_6	1,0	7,4	1,7	21,0	88,9	4,5	4,8
26	Т, h_3	1,5	36,2	3,1	13,5	89,7	4,2	3,0
27	Т, h_8	1,1	12,3	1,2	12,9	90,3	4,3	4,2
28	А, h_8	1,9	7,4	1,7	4,0	93,6	2,3	2,4
29	А, h_8	3,2	5,3	1,5	4,2	93,7	1,9	2,9

Для этого использовали следующие формулы:

$$\Delta m = \frac{h_2 - h_1}{m_0}\gamma \text{ , мг/г,} \qquad (1)$$

где h – высота, проведенная от нулевой линии ДТГ к ее действующему значению в данный момент времени, мм; m_0 – навеска исследуемого материала, г; γ – чувствительность весовой установки, мг/мм.

Среднюю скорость потери массы (V) рассчитывали по выражению:

$$V = \frac{\Delta m}{t}\text{, мг/г·с,} \qquad (2)$$

где t – время процесса, с.

По выражению (2) также определяли скорость потери массы в точках экстремумов в пределах линейного участка кривой потери массы.

Для предварительной оценки эффективной энергии активации ($E_{акт}$) процесса образования парогазовой фазы из органической массы угля в температурном интервале основного термического разложения применяли метод расчета, описанный в работе [9]. Кривую изменения температуры образца (T) делили на отрезки с шагом в 20 °С до температуры максимальной скорости потери массы (T_{max}) по кривой ДТГ. По кривой ТГ определяли соответствующую каждому текущему значению температуры величину потери массы – m_τ. За условную конечную величину m_k принимали потерю массы при 950 °С: рассчитывали разность $m_\tau - m_k$ и отношение $(m_\tau - m_k)/m_k$. Затем находили последовательно значение $\lg(m_\tau - m_k)/m_k$ и $-\lg[(m_\tau - m_k)/m_k]$. Определение $E_{акт}$ производили графически, строя зависимость $\lg[(m_\tau - m_k/m_k)]$ от $1/T$. Наклон прямой к оси абсцисс характеризует величину эффективной энергии активации процесса потери массы, которую рассчитывали по уравнению (3):

$$E_{акт} = \frac{19{,}1 \times T_2 \times T_1 \times [\lg k_2 - \lg k_1]}{(T_2 - T_1) \times 1000} \text{ (кДж/моль),} \qquad (3)$$

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

где T_2 и T_1 – значения температуры для двух точек на отрезке прямой; k_1 и k_2 – константы скорости реакций при температурах T_1 и T_2, определяемые как значения $-\lg[(m_\tau - m_k)/m_k)]$, соответствующие этим температурам.

Порядок реакции определяли по формуле:

$$n = \sqrt{\frac{b}{0{,}63a}}, \qquad (4)$$

где $\frac{b}{a}$ – асимметрия максимума основного разложения на кривой ДТГ [10].

Условия эксперимента обеспечивают воспроизводимость результатов с точностью ±1 % [11].

На рис. 1 приведены кривые ДТГ в интервале температур 20...800 °С, которые характеризуют скорость потери массы углеобразователями и углями ряда метаморфизма. По данным кривым определены значения температуры начала ($T_н$) и окончания ($T_к$) интервала основного разложения, а также температура максимума (T_{max}) эндоэффекта исследуемых образцов. Видно, что с увеличением содержания углерода в образцах температурный интервал основного термического разложения смещается в область более высоких температур, изменяется его ширина.

Характер изменения формы кривой ДТГ показывает, что температурная область максимального разложения является для каждого образца специфической. Она одновременно отображает как общность структурной организации всех углеродсодержащих материалов, так и характерные различия на конкретной стадии углефикации.

Температурный максимум T_{max}, соответствующий наибольшей скорости потери массы, – это та температурная точка, которая отделяет температурную область преимущественной деструкции (нисходящая ветвь ДТГ) от области, где скорость конденсационных процессов выше по сравнению со скоростью процессов деструкции (восходящая ветвь ДТГ).

Как следует из рис. 1 и данных количественного анализа кривых ТГ, приведенных в табл. 2 и 3, в различных температурных интервалах деструкция твердых топлив протекает с различной скоростью. Первый интервал (20...200 °С) соответствует удалению влаги, а также выделению из их пористой структуры адсорбированных газов (CO, CO_2, CH_4 и др.), и характеризуется несимметричностью формы сигнала.

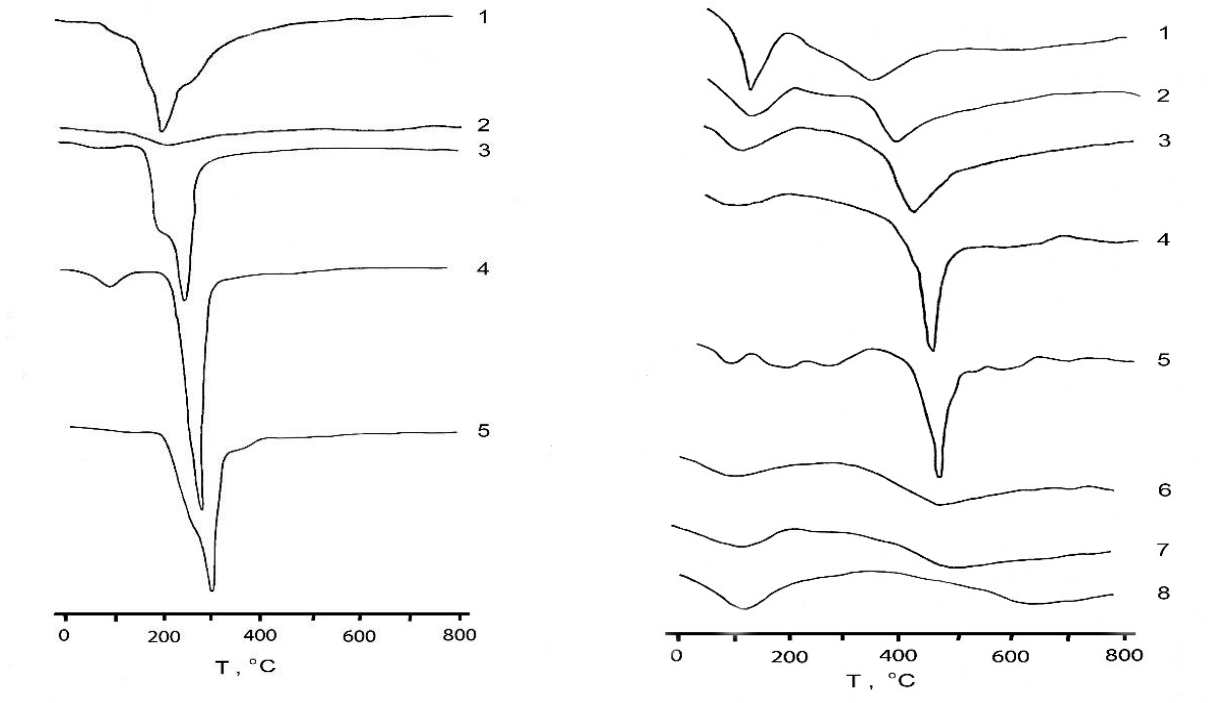


Рис. 1. Кривые ДТГ для твердых топлив:
а – углеобразователи, C^{daf}, %: *1* – лигнин, 59,0; *2* – торф, 57,0; *3* – древесина, лист., 52,8; *4* – целлюлоза, 44,3; *5* – хвойная древесина, 51,6;
б – угли ряда метаморфизма, C^{daf}, %: *1* – бурый, 66,8; *2* – длиннопламенный, 76,2; *3* – газовый, 82,7; *4* – жирный, 85,4; *5* – коксующийся, 88,6; *6* – отощенно-спекающийся, 88,9; *7* – тощий, 90,3; *8* – антрацит, 93,7

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Табл. 2. Потеря массы Δm твердыми топливами в интервале температур 200...900 °С по кривой ТГ

№ п/п	C^{daf}, %	Потеря массы, % daf при температуре (°С)							
		200	300	400	500	600	700	800	900
1	44,3	4,4	9,9	78,0	83,5	87,9	92,3	94,5	96,7
2	51,6	2,2	28,7	66,2	71,8	75,1	78,2	82,8	87,2
3	52,8	0,5	19,9	66,2	75,1	80,5	86,1	90,5	95,0
4	57,0	7,9	25,3	43,1	55,5	62,4	69,8	78,3	89,6
5	57,0	1,7	10,0	21,7	26,7	33,3	36,7	41,7	48,4
6	59,0	1,3	16,7	40,1	48,8	54,1	57,5	60,8	63,5
7	62,4	1,9	8,0	20,2	33,0	39,2	43,5	47,7	51,4
8	64,1	32,1	40,9	53,7	63,7	69,5	74,8	78,8	83,5
9	65,4	13,3	31,4	43,0	55,3	63,8	72,3	78,6	86,4
10	66,8	13,7	22,1	38,6	48,0	55,6	62,7	69,7	77,3
11	69,6	1,8	14,4	30,7	47,6	53,0	57,2	62,0	66,2
12	71,0	13,0	18,5	37,0	47,9	52,5	56,3	58,4	60,0
13	74,3	14,9	20,2	31,2	42,7	48,7	52,9	55,1	56,5
14	76,6	1,0	5,0	11,5	22,0	28,5	33,0	35,5	39,0
15	76,2	4,7	8,9	14,8	24,1	29,5	33,9	35,7	40,0
16	79,0	7,9	11,6	18,8	29,3	36,4	42,0	45,8	50,3
17	82,2	3,8	8,0	9,2	19,7	27,2	31,8	35,6	39,4
18	82,7	3,7	4,7	8,1	18,0	23,6	25,8	30,1	32,0
19	83,5	0,5	1,2	3,4	14,4	20,2	23,6	25,5	27,4
20	84,3	0,5	1,2	3,4	15,4	20,7	23,6	25,5	27,9
21	85,4	1,6	1,8	3,6	16,0	24,9	32,5	37,3	44,4
22	86,1	1,8	2,3	4,1	14,7	19,4	22,1	24,9	27,7
23	87,4	1,9	4,5	7,5	19,5	24,7	27,7	30,3	33,7
24	88,6	3,8	9,1	11,4	19,7	24,3	27,3	27,7	32,3
25	88,9	1,4	1,6	2,8	7,4	12,0	15,5	17,9	20,4
26	89,7	0,6	1,8	3,0	6,7	10,9	15,7	17,5	20,5
27	90.3	0,4	0,8	1,5	4,6	9,5	13,7	16,6	19,1
28	93,6	4,0	4,7	5,0	6,0	7,7	10,5	12,9	15,4
29	93,7	3,3	3,5	3,7	4,0	5,6	7,7	9,3	10,7

Второй интервал связан с разложением органической массы топлива. Его протяженность ($T_н...T_к$) зависит от содержания C^{daf} и структурных особенностей ТТ. С увеличением степени метаморфизма указанный интервал смещается в область более высоких температур. Второй пик также несимметричен, что в первую очередь связано с порядком «реакции» (n).

Наличие для некоторых углей слабо выраженного эффекта, связанного с потерей массы в температурной области 500...600 °С, объясняют разрушением органоминеральных связей или минералов угля, таких как каолинит, сидерит, пирит. Выше температуры 600 °С кривые ДТГ практически выполаживаются, а скорость разложения органической массы для всех исследуемых образцов значительно снижается и становится постоянной.

Наличие небольших эндоэффектов и потери массы в данной области указывает на протекание процессов вторичного газовыделения.

Значения параметров $T_н$, $T_к$ и T_{max}, ширины эффекта на кривой ДТГ закономерно меняются с увеличением содержания C^{daf}. Следовательно, местоположение и ширина области $T_н...T_к$ и значение T_{max} являются величинами, четко отражающими структуру конкретного топлива, а область $T_н...T_к$ отображает как общность структурной организации всех твердых топлив, так и ее характерные различия на конкретной стадии углефикации. Наибольшей потерей массы характеризуются углеобразователи (C^{daf}=44,3...59,0 %). Так, для целлюлозы Δm при 900 °С достигает 96,4 %, для лигнина – 63,5 % и для бурых углей – 86,4...55,1 % (см. табл. 2).

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Табл. 3. Результаты дериватографического анализа твердых топлив

C^{daf}, %	Данные ДТГ, °С			Интервал основного разложения, daf		T_{max}, daf		Общая потеря массы при 950 °С, % daf	Порядок реакции, n	Константы скорости		$E_{акт}$, кДж/моль
	$T_н$	T_{max}	$T_к$	Δm, мг/г	$V_{\Delta m}$, мг/г·мин	Δm, мг/г	$V_{\Delta m}$, мг/г·с			k_1	k_2	
44,3	260	320	420	736,0	0,62	363,0	2,01	99,4	1,5	0,032	0,102	115,4
51,6	220	330	450	701,0	0,44	210,0	1,17	98,2	0,9	0,088	0,242	75,0
52,8	210	310	430	662,0	0,46	188,0	1,04	90,5	0,8	0,097	0,273	84,0
56,8	200	275	500	183,0	0,28	67,0	0,37	94,6	1,6	0,065	0,119	33,9
57,0	200	300	375	167,0	0,14	50,0	0,28	49,1	1,1	0,066	0,119	39,9
59,0	175	295	475	471,0	0,25	90,0	0,50	66,8	1,2	0,040	0,120	71,6
62,4	230	400	485	300,0	0,17	52,0	0,29	53,2	0,9	0,144	0,139	63,2
64,1	220	380	550	333,0	0,15	50,0	0,28	85,3	1,0	0,381	0,458	20,6
65,4	200	375	500	476,0	0,23	66,0	0,37	90,9	1,0	0,197	0,241	22,1
66,8	195	370	540	391,0	0,16	42,0	0,24	81,0	0,8	0,211	0,284	31,4
69,6	230	395	490	415,0	0,24	72,0	0,40	69,2	1,0	0,179	0,297	63,2
71,0	205	365	550	369,0	0,16	70,0	0,39	60,9	1,3	0,219	0,323	40,0
74,3	250	405	500	256,0	0,15	41,0	0,23	57,1	1,0	0,284	0,378	36,6
76,6	300	425	500	170,0	0,13	35,0	0,20	40,1	1,0	0,144	0,218	50,0
76,2	300	405	480	132,0	0,12	33,0	0,23	41,9	1,1	0,199	0,255	31,9
79,0	320	405	480	146,0	0,13	32,0	0,18	54,0	1,2	0,178	0,241	37,9
82,2	295	425	500	151,0	0,11	29,0	0,16	42,3	1,0	0,116	0,166	37,9
82,7	250	425	510	140,0	0,09	31,0	0,22	34,2	0,9	0,112	0,180	67,3
83,5	310	440	530	159,0	0,11	43,0	0,24	33,6	1,1	0,061	0,159	125,8
84,3	370	450	525	149,0	0,15	48,0	0,27	29,8	1,3	0,076	0,192	148,1
85,4	365	445	540	178,0	0,16	58,0	0,32	48,5	1,6	0,049	0,098	108,3
86,1	370	440	515	129,0	0,15	46,0	0,26	30,4	1,4	0,081	0,201	124,4
87,4	340	455	515	154,0	0,13	34,0	0,23	36,3	0,9	0,145	0,285	110,8
88,6	395	475	520	99,0	0,12	47,0	0,32	33,8	0,9	0,272	0,416	74,6
88,9	360	475	620	105,0	0,07	18,0	0,12	21,8	1,3	0,095	0,176	108,1
89,7	425	525	660	115,0	0,08	18,0	0,10	22,3	1,5	0,130	0,207	103,2
90,3	400	550	650	102,0	0,07	12,0	0,09	20,8	1,1	0,171	0,240	83,2
93,6	520	625	750	60,0	0,04	10,0	0,06	17,4	1,4	0,374	0,461	66,4
93,7	525	625	750	42,0	0,03	5,0	0,03	12,1	1,4	0,372	0,488	85,4

С увеличением содержания C^{daf} термическая устойчивость органической массы ТТ снижается, процесс сопровождается меньшей потерей массы (меньшей величиной V^{daf}). Как следствие, структура ТТ становится более упорядоченной, в основном за счет отщепления от основной макромолекулы угля наименее устойчивых в термическом отношении структурных фрагментов. Видно, что для длиннопламенных углей (C^{daf}=6,2...79,0 %) потеря массы может достигать 50,3 %, тогда как для газовых углей (C^{daf}=82,2...84,3 %) и жирных (C^{daf}=85,4...87,4 %) она колеблется в пределах 44,4...27,7 %. Наименьшей потерей массы характеризуются тощие угли (C^{daf}=89,7...90,3 %) и антрациты (C^{daf}=93,6...93,7 %), для которых Δm составляет 20,5…19,1 % и 15,4…10,7 % соответственно. Основная потеря массы углеобразователями происходит до температуры 400...500 °С и достигает 78,0...83,5 % (целлюлоза), тогда как для антрацитов эта величина составляет 4,0...6,0 %.

Из приведенных в табл. 3 данных следует, что протяженность температурного интервала основного разложения для углеобразователей составляет 200...420 °С, а значение T_{max} колеблется в пределах 300±30 °С. С увеличением степени метаморфизма угля от бурых до тощих интервал основного разложения так же, как и T_{max}, смещается в область более высоких температур (375...525 °С).

Для антрацитов интервал $T_н...T_к$ находится в пределах 525…750 °С, а T_{max} достигает 625 °С. Следовательно, температурные границы данной области существенно различаются для каждого исследуемого образца. Расширение или сужение интервала температур $T_н...T_к$ может указывать на меньшую или большую однородность связей, разрывающихся при данной температуре.

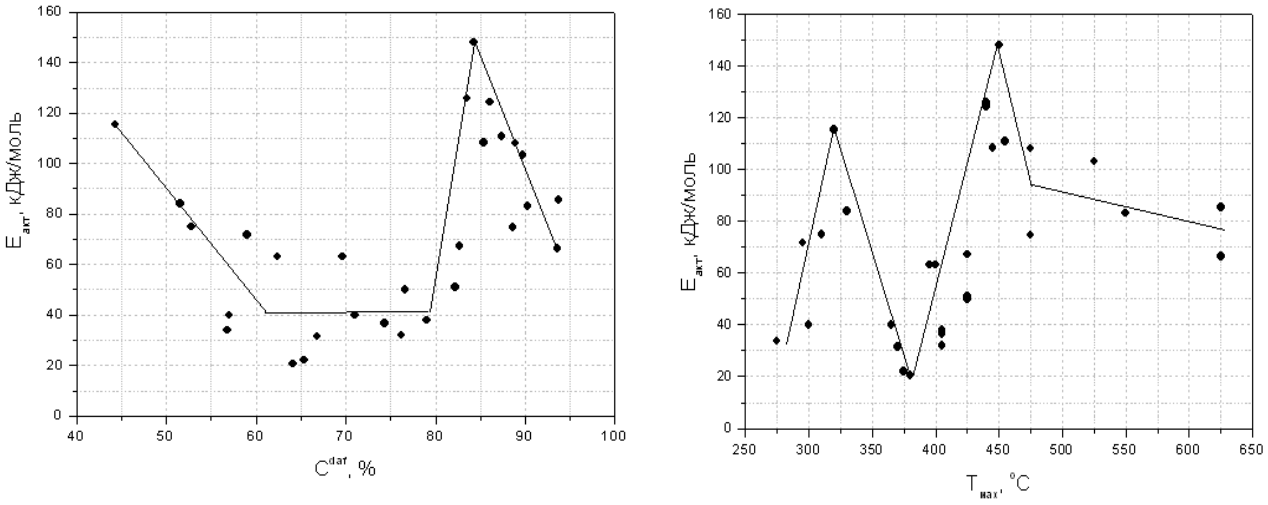
Положение T_{max} на кривой ДТГ определяется как содержанием C^{daf} в образцах, так и их структурными особенностями.

Анализ полученных дериватограмм показывает, что температура T_{max} является важнейшей характеристикой, которая несет объективную информацию о составе и структурных особенностях ТТ.

Как видно из табл. 3, потеря массы образцом хорошо коррелирует с положением топлива в ряду углефикации и наличием в его макромолекуле связей с различной прочностью. Подсчитано, что наибольшая потеря массы (Δm, мг/г daf) в области $T_н...T_к$ и при T_{max} характерна для углеобразователей – 736 и 363 мг/г (целлюлоза). Этот показатель снижается в процессе углефикации до 60...42 и 10...5 мг/г для антрацита.

Одновременно прослеживается снижение скорости потери массы ($V_{\Delta m}$, мг/г·мин daf) для всех исследуемых образцов. Приведенные данные по Δm и $V_{\Delta m}$ хорошо коррелируют с общей потерей массы при 950 °С и константами скорости процесса термодеструкции для всех изученных образцов твердых топлив. Рассчитанный порядок реакции процесса термодеструкции (n) близок к единице и изменяется в интервале 0,8...1,6.

На рис. 2 представлены кривые, описывающие взаимосвязь между содержанием углерода (C^{daf}), температурой T_{max} и эффективной энергией активации ($E_{акт}$), вычисленной по данным дериватографии. Из рис. 2а следует, что величина $E_{акт}$ изменяется по кривой, имеющей два хорошо выраженных максимума для образцов с содержанием C^{daf}=40...50 % и C^{daf}=83...87 %.



а б

Рис. 2. Изменение величины $E_{акт}$:
а – от содержания C^{daf} в твердом топливе; *б* – от температуры T_{max} основного термического разложения твердого топлива

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

На кривой рис. 2б также имеется два максимума в области температур 300...330 и 440...460 °С. Максимальные и минимальные значения $E_{акт}$, показанные на рис. 2а и 2б, хорошо согласуются между собой. Первый из них относится к углеобразователям (целлюлоза и древесина), а второй – к углям средней стадии метаморфизма, которые проявляют спекающиеся свойства.

Полученные данные объясняют отличия в термоустойчивости и технологических характеристиках исследуемых углей тем, что на разных стадиях углефикации преобладают реакции, отличающиеся по величине энергии активации ввиду особенностей их состава и структуры [12,13].

Согласно литературным данным [14,15], углеобразователи и бурые угли обогащены различными кислородсодержащими группами, а угли средней стадии метаморфизма – алифатическими группами. Соответственно, молодые угли, содержащие максимальное количество кислорода, являются наименее термостабильными и показывают минимальное значение $E_{акт}$ процесса термодеструкции.

Энергия разрыва *C–C* связи нафтеновых, алкилароматических структур выше, чем энергия разрыва *C–O–* и *C–S–* связей, что обеспечивает максимальное значение $E_{акт}$ для спекающихся углей. Закономерности изменения $E_{акт}$ в зависимости от T_{max}, согласуются с зависимостью $E_{акт}=f(C^{daf})$.

Таким образом, полученные результаты дериватографического анализа дают сравнительную оценку кинетики процесса термической деструкции полного ряда твердых топлив (углеобразователи и угли) в широком диапазоне температур и в строго идентичных условиях нагрева.

Полученные результаты позволяют заключить, что существующие различия в величине кинетических характеристик углеобразователей и углей разной стадии метаморфизма связаны, прежде всего, с соотношением кислородсодержащих и алифатических групп в их среднестатистической структурной единице.

Выводы

Проведено систематическое исследование широкого ряда твердых топлив (углей и углеобразователей) методом дериватографии; описана динамика процесса термодеструкции образцов в интервале температур 20...950 °С по данным ТГ и ДТГ; детально изучен интервал основного термического разложения твердых топлив, соответствующий температурному интервалу полукоксования, рассчитаны его основные параметры. Предложен новый показатель качества углей – температура максимума основного разложения (T_{max}), который должен использоваться в качестве конечной температуры в условиях стандартного полукоксования.

Показано, что величины $E_{акт}=f(C^{daf})$ и $E_{акт}=f(T_{max})$ изменяются по кривым, имеющим два хорошо выраженных максимума для образцов с содержанием C^{daf}=40,0...50,0 % (прекурсоры) и C^{daf}=83,0...87,0 % (угли средней стадии метаморфизма). Это указывает на резкое изменение макромолекулярного строения топлив в точках экстремумов и, как следствие, – на изменение структурно-группового состава первичных продуктов пиролиза при переходе от углеобразователей к углям разной стадии метаморфизма.

Список литературы

1. Топливо твердое минеральное. Методы определения выхода продуктов полукоксования (ИСО 647-74): ГОСТ 3168-96; введ. 1997-01-01. – К.: Госстандарт Украины, 1996. – 17 с.
2. Камнева, А.И. Теоретические основы химической технологии горючих ископаемых / А.И. Камнева, В.В. Платонов. – М.: Химия, 1990. – 288 с.
3. Аналитическая химия и технический анализ угля / И.В. Авгушевич и др. – М.: Недра, 1987. – 336 с.
4. Тайц, Е.М. Методы анализа и испытание углей / Е.М. Тайц, И.А. Андреева. – М.: Недра, 1983. – 301 с.
5. Гюльмалиев, А.М. Классификация горючих ископаемых по структурно-химическим показателям и основные пути использования ископаемых углей / А.М. Гюльмалиев, Г.С. Головин, С.Г. Гагарин. – М.: НТК «Трек», 2007. – 152 с.
6. Единая промышленно-генетическая классификация каменных углей СССР / И.В. Еремин и др. // Кокс и Химия. – 1983. – №5. – С. 4-10.
7. Оценка кинетических параметров термодеструкции каменных углей по данным термогравиметрического анализа / Е.А. Барановская и др. // Химия твердого топлива. – 1997. – №5. – С. 41-50.
8. Горюшкин, В.Ф. Определение тепловых эффектов сложных многостадийных процессов термической деструкции угля по данным ДТА / В.Ф. Горюшкин, В.В. Ошовский, В.И. Саранчук // Химия твердого топлива. – 1997. – №5. – С. 80-85.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

9. Скляр, М.Г. Химия твердых горючих ископаемых / М.Г. Скляр, Ю.Б. Тютюнников. – Киев: Высшая школа, 1985. – 247 с.
10. Беляев, Э.К. Вычисление кинетических параметров по данным дериватографических измерений / Э.К. Беляев, В.Ф. Аннопольский // Журнал физической химии. – 1975. – №3. – С. 790-793.
11. Скляр, М.Г. Исследование кинетики термического разложения углей / М.Г. Скляр, В.И. Шустиков, И.В. Вирозуб // Химия твердого топлива. – 1968. – №3. – С. 22-32.
12. Формы кислородсодержащих структурных фрагментов в бурых углях и их роль в процессе термодеструкции / Л.Ф. Бутузова и др. // Химия твердого топлива. – 1991. – №2. – С. 11-18.
13. Саранчук, В.И. Термохимическая деструкция бурого угля / В.И. Саранчук, Л.Ф. Бутузова, В.Н. Минкова. – Киев: Наук. думка, 1993. – 224 с.
14. Саранчук, В.И. Термохимические превращения на отдельных стадиях процесса термоокислительной деструкции бурого угля / В.И. Саранчук, Л.Ф. Бутузова, Л.Н. Исаева // Химия твердого топлива. – 1989. – №6. – С. 34-40.
15. Лазаров, Л. Структура и реакции углей / Л. Лазаров, Г. Ангелова. – София: Изд-во БАН, 1990. – 232 с.

V.N. Shevkoplyas /Cand. Sci. (Chem.)/
Institute of Physical -Organic Chemistry and Carbon Chemistry (Donetsk)
L.F. Butuzova /Dr. Sci. (Chem.)/
Donetsk National Technical University, (Donetsk)
V.A. Kolbasa, G.N. Butuzov /Cand. Sci. (Chem.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)

DERIVATOGRAPHICAL STUDIES OF COAL PRECURSORS AND COALS OF METAMORPHISM RANGE

Background. *Derivatography is one of the main methods of identifying the relationship between thermal stability, technological characteristics and the composition of solid fuels (TP), as well as predicting their further most rational processing. The objective of this paper is to determine the characteristic parameters of the thermal destruction process of a full range of natural SF (coal precursors and coals) under strictly identical conditions of the derivatographic method in a wide temperature range – 20...950 °C and revealing of interrelationships between the position of the fuel in the coalification range, its composition and properties.*

Materials and/or methods. *As objects of study coals of metamorphism range (brown, stone and anthracite) of various deposits used. The study conducted in Q1500D derivatograph of Paulik Paulik-Erdei system in an inert gas (argon) atmosphere using platinum crucible with lid. The heating rate was 10 °C /min, the weight of coal – 500 mg.*

Results. *Based on the analysis of the obtained derivatograms calculated such parameters of thermal stability of the samples as dynamics of the mass loss when heated to 950 °C, the length of the temperature interval of the primary destruction, the temperature of the basic destruction maximum (T_{max}), the energy value of the valid activation (E_{act}) of the process of gassing, the rate of mass loss and the reaction order. The processes occurring at each specific temperature for each sample are characterized, taking into account its elemental composition and position in the range of coalification. The interval of the basic thermal destruction of solid fuels corresponding to the temperature interval of semi-coking studied in detail. It is found that the temperature T_{max} is a characteristic value that carries objective information about the composition and structural features of each specific fuel and used as the final temperature under standard semi-coking.*

Conclusion. *$E_{act}=f(C^{daf})$ and $E_{act}=f(T_{max})$ change curves clearly show that at different stages in the process of coalification, the process characteristics change not uniformly, but spasmodically. Therefore, at the extremum points there is a sharp change in the macromolecular structure of fuels and, as a consequence, a change in the structural and group composition of primary pyrolysis products during the transition from carbon formers to coals of different metamorphism stages.*

Keywords: *coal precursors, coals of metamorphism range, derivatography, mass loss, activation energy, T_{max} temperature.*

Сведения об авторах

В.Н. Шевкопляс
Author ID: 6603169954
Телефон: +380 (95) 633-03-15
Эл. почта: v-shevkoplyas@ukr.net

В.А. Колбаса
SPIN-код: 4466-7867
Телефон: +380 (95) 059-55-32
Эл. почта: vikula.ka@mail.ru

Л.Ф. Бутузова
SPIN-код: 7391-2663
Author ID: 7004736806
ORCID iD: 0000-0002-4232-3057
Телефон: +380 (50) 921-38-51
Эл. почта: ludmila.lfb@yandex.ru

Г.Н. Бутузов
SPIN-код: 4448-4394
Author ID: 8701390000
Телефон: +380 (50) 589-74-89
Эл. почта: ludmila.lfb@yandex.ru

Статья поступила 06.07.2019 г.
© В.Н. Шевкопляс, Л.Ф. Бутузова, В.А. Колбаса, Г.Н. Бутузов, 2019
Рецензент д.х.н., проф. Ю.Б. Высоцкий



ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, НАПРАВЛЯЕМЫМ В РЕДАКЦИЮ

1. Основной текст статьи должен содержать такие необходимые элементы, выделенные заголовками, как:

– **постановка проблемы** в обобщенном виде и ее связь с важными научными или практическими задачами;

– **анализ последних исследований и публикаций**, в которых начато решение данной проблемы и на которые опираются авторы, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена данная статья;

– формулировка **цели (задачи) исследования**;

– изложение **основного материала исследования** с полным обоснованием полученных научных результатов;

– **выводы** по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития данного направления.

2. Статья, основной текст вместе с рисунками и др. нетекстовыми элементами, должна быть объемом **8…10 полных** страниц формата А4 (210×297 мм) с полями **20** мм с каждой стороны. Рукопись статьи необходимо оформлять с помощью редактора MS Word. Шрифт – Times New Roman, **12** пт, стиль – обычный. Межстрочный интервал – одинарный. Расстановка переносов – автоматическая. Выравнивание – по ширине страницы. Страницы не нумеровать.

3. Структура статьи (каждый элемент с новой строки): код УДК; инициалы и фамилии авторов с указанием ученой степени каждого (количество авторов **не более 3-х** от одной организации); название организации, город, где работают авторы; название статьи; аннотация на русском языке (объемом **не более 300** символов); ключевые слова (**от 3 до 5**); основной текст статьи; список литературы. Сокращение слов в тексте, рисунках и таблицах не допускается.

В аннотации на русском языке сжато излагается формулировка задачи, которая решена в статье, и приводятся полученные основные результаты.

В конце статьи, после списка литературы приводятся инициалы и фамилии авторов, ученые степени, организации, города, название статьи, аннотация и ключевые слова на английском языке

Аннотация на английском языке должна представлять собой резюме, призванное выполнять функцию независимого от статьи источника информации. Резюме должно быть информативным (не содержать общих слов), оригинальным (не являться калькой аннотации на других языках), содержательным (отражать основное содержание статьи и результаты исследований), структурированным (следовать логике описания результатов в статье), компактным, но не коротким (объемом **от 250 до 300** слов). Типичная структура резюме: состояние вопроса (**Background**); материалы и/или методы исследования (**Materials and/or methods**); результаты (**Results**); заключение (**Conclusion**).

Внимание! Убедительная просьба не разбивать текст на колонки, как это сделано в журнале, т.к. это усложняет редакторскую обработку статьи!

4. **Обязательным условием** является наличие в статье графического материала (рисунков, графиков, схем, фотографий), размером **не менее 80×80** мм, в формате *.tif или *.jpg, разрешением **не менее 300** dpi. Графический материал внедренными объектами размещается по тексту после первого упоминания, не разрывая текста абзаца. Все позиции, обозначенные на рисунках, должны быть объяснены в тексте. Под каждым рисунком указывается его порядковый номер и название (выравнивание по центру страницы, без точки в конце). Рисунки должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу.

Внимание! Запрещается внедрять графические материалы в виде объектов, связанных с др. программами, например, с КОМПАС, MS Excel и т.п. Рисунки, выполненные непосредственно в MS Word не принимаются.

5. Математические формулы необходимо выполнять с помощью редактора формул **MS Equation Editor 3.0** в соответствии со следующими размерами: обычный символ – **11** пт; крупный индекс – **7** пт; мелкий индекс – **5** пт; крупный символ – **13** пт; мелкий символ – **8** пт.

Все величины, входящие в формулы, должны быть объяснены в тексте. Формулы должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу. Формулы выполняются курсивом, **кроме цифр и символов греческого алфавита**. Формулы нумеруются (справа в круглых скобках, не отступая от формулы) **только в том случае**, если в тексте на них имеются ссылки.

Внимание! Запрещается выполнять формулы с помощью MathCAD или др. аналогичных программ.

6. Таблицы должны иметь порядковый номер и название (выравнивание по центру страницы, без точки в конце) и располагаться по тексту после первого упоминания, не разрывая текста абзаца. Таблицы должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу.

7. **Обязательным условием** является наличие в статье списка литературы, который приводится после выводов через один интервал (пустую строку) под заголовком **Список литературы**. Перечень ссылок должен быть составлен в порядке упоминания в тексте. Ссылки на литературу по тексту заключаются в квадратные скобки. В списке литературы должно быть **не менее 3-х** публикаций, вышедших **за последние 5** лет, а также **не менее 3-х** зарубежных (англоязычных) публикаций.

Для принятия решения о публикации статьи в журнале, в адрес редакции необходимо выслать:

– сопроводительное письмо (с указанием, что статья ранее нигде не публиковалась) от организации, где работают авторы, и сведения об авторах статьи;

– экспертное заключение о возможности опубликования материалов в прессе и других средствах массовой информации, заверенное печатью и подписью руководителя организации, где работают авторы;

– электронный вариант статьи (имя файла составляется из фамилий авторов, например, ИвановПетров.doc) и сведений об авторах (имя файла – ИвановПетров_sved.doc). *В сведениях об авторах для каждого соавтора обязательно должен быть указан телефон, адрес персональной эл. почты, а также коды регистрации в наукометрических базах данных.*

Для ускорения подготовки очередных номеров журнала, просьба передавать сопроводительное письмо в отсканированном виде, электронный вариант статьи и сведения об авторах по эл. почте на адрес: **vestnikdonntu@gmail.com**

Внимание! Убедительная просьба, проверить получение редакцией материалов любым из способов (по телефонам **+380 (66) 176-72-65, +380 (62) 301-07-89** или эл. почте).

Редакция оставляет за собой право возвращать статьи авторам на доработку в следующих случаях: статья небрежно оформлена и не соответствует требованиям редакции журнала, приведенным выше; статья требует доработки в соответствии с замечаниями рецензента и редакторов; отсутствует сопроводительное письмо от организации, где работают авторы или сведения об авторах.

Требования к рекламно-информационным материалам согласовываются непосредственно с редакцией журнала.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

НАУЧНЫЕ ИЗДАНИЯ Донецкого национального технического университета



Журнал «Вести Автомобильно-дорожного института = Bulletin of the Automobile and Highway Institute»

Свидетельство о регистрации СМИ ААА № 000051 от 20 октября 2016 г.
Приказ МОН ДНР № 960 от 09.07.2019 г. о включении в перечень рецензируемых научных изданий ВАК ДНР
Лицензионный договор с РИНЦ № 427-07/2013 от 23.07.2013 г.

Периодичность – 4 раза в год

Научные направления:
05.04 Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение;
05.22 Транспорт;
05.23 Строительство и архитектура;
08.00 Экономические науки.

Подробная информация - http://vestnik.adidonntu.ru



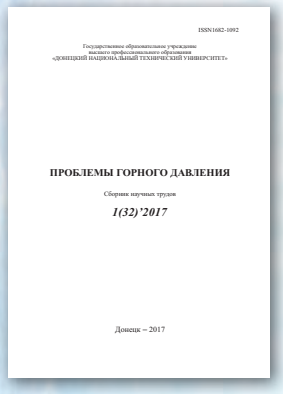
Научный журнал «Информатика и кибернетика»

Свидетельство о регистрации СМИ ААА №000145 от 20.06.2017 г.
Приказ МОН ДНР № 34/16 от 28.01.2019 г. о включении в перечень рецензируемых научных изданий ВАК ДНР
Лицензионный договор с РИНЦ № 425-07/2016 от 14.07.2016 г.

Периодичность – 4 раза в год

Научные направления:
05.13 Информатика, вычислительная техника и управление;
05.01 Инженерная геометрия и компьютерная графика.

Подробная информация - http://infcyb.donntu.org



Международный научный журнал «Проблемы горного давления»

Свидетельство о регистрации в СМИ ААА №000142 от 20.06.2017 г.
Лицензионный договор с РИНЦ № 425-07/2016 от 14.07.2016 г.

Периодичность – 4 раза в год

Научные направления:
25.00 Науки о земле;
05.26 Безопасность деятельности человека.

Подробная информация - http://pgd.donntu.org



Студенческий научно-технический журнал «Инженер»

Свидетельство о регистрации СМИ ААА №000134 от 06.06.2017 г.

Периодичность – 2 раза в год

Научно-исследовательская часть

ДОНЕЦКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

science.donntu.org

ДонНТУ сегодня – это один из ведущих центров научной мысли Донбасса:

- *более 700 научно-педагогических работников;*
- *9 научных лабораторий, в т.ч. отдел интеллектуальной собственности и патентно-лицензионной работы;*
- *более 50 научных направлений и научных школ;*
- *ежегодно более 60 научно-исследовательских работ, в т.ч. 5 по договорам с промышленными предприятиями;*
- *4 диссертационных совета по 10 научным специальностям;*
- *14 направлений подготовки кадров высшей квалификации в аспирантуре и докторантуре;*
- *7 научных изданий, входящих в перечень ВАК ДНР и включенных в наукометрические базы данных (РИНЦ и др.);*
- *ежегодно более 2000 публикаций в научных изданиях республиканского и международного уровня;*
- *ежегодно порядка 120 научных и научно-технических мероприятий, в т.ч. более 20 мероприятий международного уровня;*
- *более 30 информационных ресурсов;*
- *базовая площадка Международного научного форума ДНР «Инновационные перспективы Донбасса: инфраструктурное и социально-экономическое развитие»*



science.donntu.org/video
science.donntu.org/photo
science.donntu.org/rinc
science.donntu.org/book