

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ 2021 № 4



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2021 № 4

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

№ 4 2021

Учредитель журнала:

ЗАО «Солигорский Институт проблем
ресурсосбережения с Опытным
производством»

Научно-технический журнал

Издается с декабря 1998 г.

Выходит четыре раза в год

Редакция:

Главный редактор
Прушак Виктор Яковлевич

Заместитель главного редактора
Дворник Александр Петрович

Редакционная коллегия:

С.С. Андрейко (Россия), П.Н. Богданович (Беларусь), И.В. Войтов (Беларусь),
Ц. Вутов (Болгария), В.А. Губанов (Беларусь), М.А. Журавков (Беларусь),
Н.П. Крутько (Беларусь), Е.И. Марукович (Беларусь), Ф.И. Пантелеенко (Беларусь),
Б.И. Петровский (Беларусь), Н.Б. Рыспанов (Казахстан), С.В. Харитончик (Беларусь),
В.М. Шаповалов (Беларусь), В.К. Шелег (Беларусь), А.О. Шимановский (Беларусь)



Адрес редакции:

ул. Козлова, 69, 223710, г. Солигорск, Минская обл., Республика Беларусь
тел.: (+375 174) 33 01 07, факс: (+375 174) 26 28 37
e-mail: onti@sipr.by

Журнал включен в перечень научных изданий РБ для опубликования результатов диссертационных исследований по научным направлениям: технические науки (геотехнология, материаловедение, машиностроение).
Журнал включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

© ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

Ущাপовский И.Ф., Кафанова Т.П., Прохоров Н.Н., Ефимов А.М. Применение комплекса подземных геофизических исследований в горных выработках, пересекающих Краснослободскую зону разломов	5
Журавков М.А., Николайчик М.А. Конечно-элементное моделирование взаимодействия подъемного сосуда с конструктивными элементами шахтного ствола	15
Диулин Д.А. Оценка напряженно-деформированного состояния крепи вертикальных шахтных стволов Старобинского месторождения калийных солей	22
Гарнишевский А.А. Влияние различных схем направления очистной выемки и передвижки забойной крепи на степень нагруженности призабойного пространства нижних лав при слоевой выемке Третьего калийного пласта	29
Довгелюк Н.В., Масловская Е.М., Толочко З.Ю. Усиление земляного полотна железной дороги под обращение длинносоставных тяжеловесных поездов	42
Довгелюк Н.В., Масловская Е.М., Царенков А.А. Повышение безопасности движения поездов в районах с оползневой опасностью склонов земляного полотна	49

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Басалай Г.А. Динамическая модель привода бермовых фрез и отрезных коронок проходческого комбайна с соосными роторами	55
Попов В.Б., Погуляев М.Н., Веппер Л.В., Логвин В.В. Обнаружение дефектов подшипников электрических машин с помощью современных методов контроля	60
Кляус О.Н., Жолобов А.А. Теоретическое обоснование направления осей отверстий при их рассверливании и зенкерования	67
Попов В.Б., Баран И.А. Компьютерное моделирование аэродинамического процесса в системе очистки самоходного зерноуборочного комбайна	74

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Шаповалов В.М., Овчинников К.В., Мельников С.Ф., Шаповалов А.В., Напреев Р.С. Влияние отходов листового древесно-полимерного композита на физико-механические свойства композиционных материалов на основе термопластов	82
---	----

ЛЮДИ НАУКИ

Журавков Михаил Анатольевич (к 60-летию со дня рождения)	92
Перечень статей, опубликованных в журнале «Горная механика и машиностроение» в 2021 году...	93

На обложке: комбайн проходческий КРП-3 для проведения горных выработок арочной формы.
На 1-й стр.: смеситель двухвальный.
На 3-й стр.: смеситель-гранулятор.

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь.
Свидетельство о государственной регистрации СМИ № 1000 от 12.01.2010 г.
Подписаться на журнал можно в почтовых отделениях связи «Белпочта» или
по «Интернет-подписке» РУП «Белпочта» на сайте: <https://www.belpost.by/onlinesubscription/items>
Подписные индексы печатной версии журнала: 74933, 749332; электронной версии: 30006, 300062.

Ответственный секретарь А.В. Протасеня.
Подписано в печать 26.11.2021 г. Формат 60×84¹/₈. Бумага «Navigator», А4, 80 г/м².
Заказ 3661. Усл. печ. л. 11,55. Тираж 110 экз.
Отпечатано Минским областным унитарным предприятием «Слуцкая укрупненная типография»,
ул. М. Богдановича, 7, 223610, г. Слуцк, Минская область, Республика Беларусь.
ЛП № 02330/0494181 от 03.04.2009 г.

MINING MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE-BUILDING

№ 4 2021

Founder of the Journal:

JSC “Soligorsk Institute of Resources
Saving Problems with Pilot Production”

Scientific and Technical Journal

Published since December, 1998
Issued four times a year

Edition:

Editor-in-Chief
Prushak Viktor Yakovlevich

Editor-in-Chief Deputy
Dvornik Aliaksandr Petrovich

Editorial Board:

S.S. Andreiko (Russia), P.N. Bogdanovich (Belarus), I.V. Voitov (Belarus),
Tz. Voutov (Bulgaria), V.A. Gubanov (Belarus), M.A. Zhuravkov (Belarus),
N.P. Krutko (Belarus), E.I. Marukovich (Belarus), F.I. Panteleenko (Belarus),
B.I. Petrovsky (Belarus), N.B. Ryspanov (Kazakhstan), S.V. Kharitonchik (Belarus),
V.M. Shapovalov (Belarus), V.K. Sheleg (Belarus), A.O. Shimanovsky (Belarus)



Editorial Address:

69, Kozlova street, 223710, Soligorsk, Minsk region, Republic of Belarus
tel: (+375 174) 33 01 07, Fax: (+375 174) 26 28 37
e-mail: onti@sipr.by

The journal is included in the list of scientific publications of the Republic of Belarus for publishing the results of dissertation studies on scientific directions: technical sciences (geotechnology, materials engineering, machine-building).
The journal is included in Russian Science Citation Index.

© JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production”, 2021

CONTENTS

GEOTECHNOLOGY

Ushchapousky I.F., Kafanova T.P., Prohorov N.N., Efimov A.M. Application of a set of underground geophysical studies in mine workings crossing the Krasnoslobodskaya fault zone	5
Zhuravkov M.A., Nikolaitchik M.A. Finite element modeling of the lifting vessel interaction with the mine shaft structural elements	15
Diulin D.A. Assessment of the stress-strain state supports of vertical mine shafts Starobinsky potash salt deposit	22
Harnisheusky A.A. The influence of various schemes of the direction of the cleaning excavation and the movement of the downhole support to the degree of loading bottom-hole space of the lower lavas during the layered excavation of the Third potash reservoir	29
Dovgelyuk N.V., Maslovskaya E.M., Tolochko Z.Yu. Reinforcement of the railway roadbed for the circulation of long-composite heavy-weight trains	42
Dovgelyuk N.V., Maslovskaya E.M., Tsarenkov A.A. Improving the safety of train traffic in areas with landslide hazard of earth bed slopes	49

MACHINE-BUILDING

Basalai R.A. Dynamic model of the drive of the burm milling cutters and cutting crowns of a tunneling combine with coaxial rotors	55
Popov V.B., Pogulyaev M.N., Vepper L.V., Logvin V.V. Detection of defects of electric bearings machines using modern control methods	60
Klyaus O.N., Zholobov A.A. Theoretical justification of the direction of the axes of the holes during their reaming and countersinking	67
Popov V.B., Baran I.A. Computer simulation of the aerodynamic process in the cleaning system of a self-propelled grain harvester	74

MATERIALS ENGINEERING

Shapovalov V.M., Ovchinnikov K.V., Melnikov S.F., Shapovalov A.V., Napreev R.S. Influence of sheet WPC waste on the physical and mechanical properties of composite materials based on thermoplastics	82
--	----

PEOPLE OF SCIENCE

Zhuravkov Michael (for the 60 th anniversary)	92
A list of articles that have been published in the journal “Mining mechanical engineering and machine-building” in 2021	93

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 622.268.016(476)(045)

И.Ф. Ущачовский, Т.П. Кафанова, Н.Н. Прохоров, А.М. Ефимов*ОАО «Белгорхимпром», г. Солигорск, Беларусь***ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСА ПОДЗЕМНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ,
ПЕРЕСЕКАЮЩИХ КРАСНОСЛОБОДСКУЮ ЗОНУ РАЗЛОМОВ**

Аннотация. В статье приведены результаты геофизических исследований на участке пересечения Краснослободской зоны разломов горными выработками шахтного поля Краснослободского рудника 2 РУ ОАО «Беларуськалий» на уровне Третьего калийного горизонта. Рассмотрено формирование сейсмических и электрических полей в тонкослоистой среде Старобинского месторождения калийных солей в Краснослободской зоне разломов.

Ключевые слова: геофизика, шахтная сейсморазведка, метод отраженных волн, метод общей глубинной точки, метод сейсмической томографии, электроразведка, дипольное профилирование, электропросвечивание, соленосные породы, интерпретация данных геофизики, научно-техническое сопровождение горных работ.

I.F. Ushchapousky, T.P. Kafanova, N.N. Prohorov, A.M. Efimov*JSC “Belgorkhimprom”, Soligorsk, Belarus***APPLICATION OF A SET OF UNDERGROUND GEOPHYSICAL STUDIES IN
MINE WORKINGS CROSSING THE KRASNOSLOBODSKAYA FAULT ZONE**

Abstract. The article presents the results of geophysical studies at the crossing section of the Krasnoslobodskaya fracture zone by mine workings of the mine field of Krasnoslobodski mine of the 2 Mine of the JSC “Belaruskali” at the level of the Third potassium horizon. The formation of seismic and electric fields in the thin-layer structure of the Starobin potash salts deposit in the Krasnoslobodskaya fracture zone is considered.

Keywords: Geophysics, underground seismics, reflection methods, common-depth-point method, seismic tomography method, electrical exploration, dipole profiling, electric illumination, saliferous rocks, Geophysics data interpretation, R&D support for mining operations.

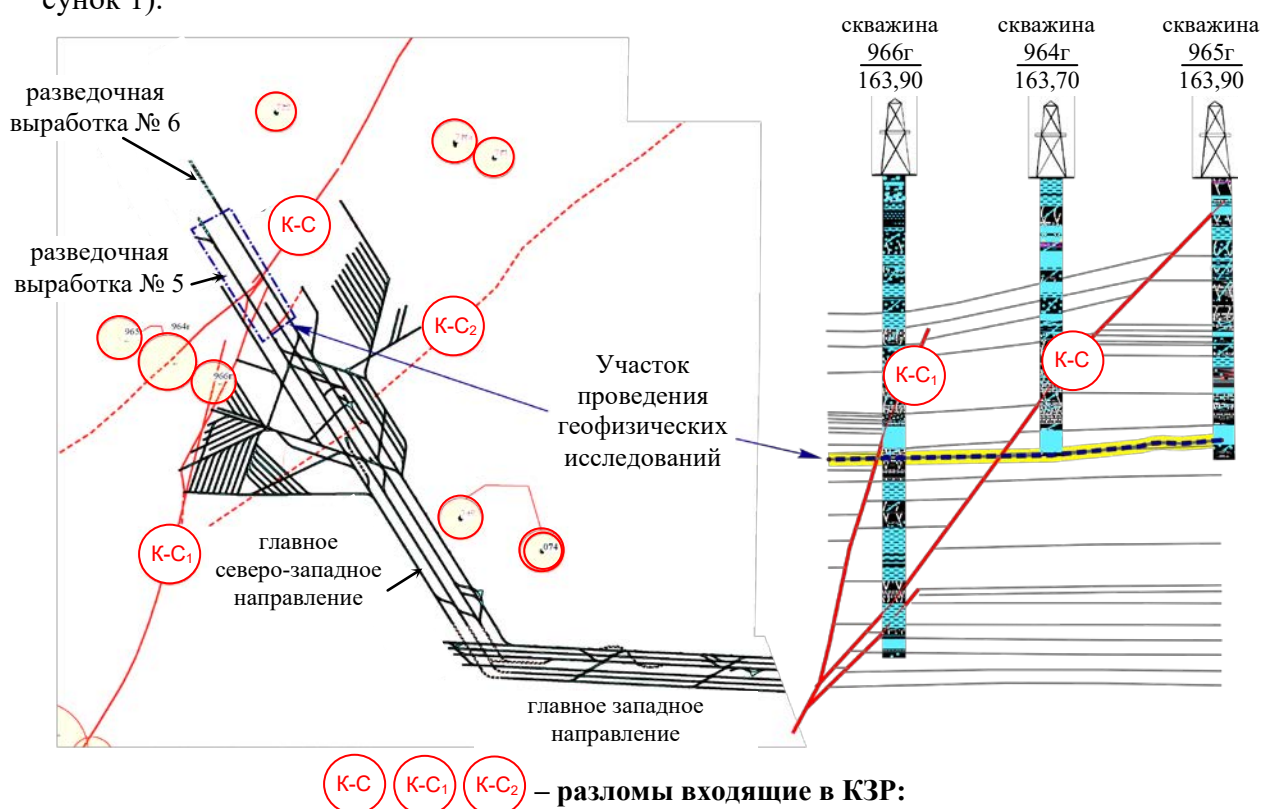
Введение. В настоящее время наряду с комплексом поверхностных геофизических исследований, выполняемых на Старобинском месторождении калийных солей, успешно применяются и совершенствуются методы подземных геофизических исследований.

На данный момент накоплен значительный опыт применения методов шахтных геофизических исследований в условиях подземных выработок рудников для решения различного рода задач, связанных с обеспечением безопасных условий в процессе эксплуатации рудников [1].

Примером решения таких задач является применение подземных геофизических исследований в горных выработках при пересечении Краснослободской зоны разломов (КЗР) на шахтном поле Краснослободского рудника 2 РУ ОАО «Беларуськалий».

Шахтное поле Краснослободского рудника 2 РУ ОАО «Беларуськалий» разделено КЗР на западный и восточный блоки. Суммарная амплитуда Краснослободской зоны разломов (КС) на уровне подошвы соленосной толщи составляет порядка 66 м. Для вскрытия и отработки запасов западного блока Третьего калийного горизонта было принято решение о пересечении КЗР подземными горными выработками.

Проходка горных выработок осуществлялась при научно-техническом сопровождении георадиолокационными методами. Научно-техническое сопровождение поэтапной проходки разведочных выработок № 5, № 6 и № 3 выполнялось из 13-й соляной пачки (восточный блок) по мере пересечения разломной зоны КС до выхода в «нормальное поле» западного блока шахтного поля Краснослободского рудника 2 РУ. После пересечения основного амплитудного сброса КС последующая проходка разведочных выработок осуществлялась в пределах 11-й соляной пачки западного блока (рисунк 1).



Краснослободский К-С, малоамплитудный сброс К-С₁, малоамплитудный скол К-С₂;
 966Г – скважины детальной разведки

**Рисунок 1. – План участка проведения геофизических исследований
 (Краснослободский рудник 2 РУ, Третий калийный горизонт)**

После проведения научно-технического сопровождения проходки горных выработок георадиолокационными методами подземной геофизики был выполнен комплекс геофизических исследований с целью обеспечения безопасных условий ведения горных работ по условиям водозащиты в разломной КЗР.

Результаты исследований. На исследуемом участке при проходке разведочных выработок № 5 и № 6 было вскрыто геологическое нарушение, основной амплитудный сброс и зона брекчированных пород Краснослободского разлома (рисунк 2).

Шахтные геофизические исследования в горных выработках, пересекающих КЗР Третьего калийного горизонта Краснослободского рудника 2 РУ, были проведены

сейсмическими (метод отраженных волн (МОВ), метод общей глубинной точки (МОГТ) и метод сейсмического просвечивания (СП)) и электроразведочными (метод дипольного электропрофилирования в режиме электропросвечивания) методами.

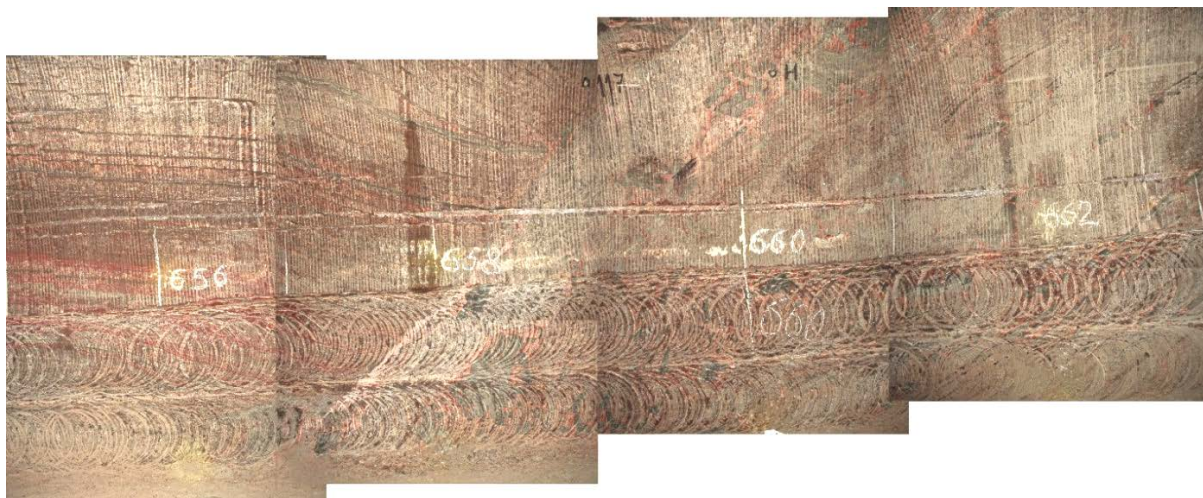


Рисунок 2. – Основной амплитудный сброс и зона брекчированных пород Краснослободского разлома (левая стенка разведочной выработки № 5 главного северо-западного направления Третьего калийного горизонта Краснослободского рудника 2 РУ

Шахтные сейсмические исследования методом МОВ и методом МОГТ были проведены с целью изучения геологического строения пород, покрывающих и подстилающих Третий калийный горизонт.

При проведении шахтных сейсмических работ регистрация сейсмических сигналов осуществлялась цифровой сейсмической станцией «ЭЛЛИСС-3». Возбуждение упругих колебаний проводилось с помощью механического ударного устройства. Для выделения слабых сейсмических сигналов применялось накопление путем суммирования до 3 воздействий (ударов) на пункте возбуждения. Интервал расположения пунктов возбуждения колебаний – 6 м. Направление действия ударной силы осуществлялось в почву и кровлю горной выработки. В качестве приемников использовались приборы СВ-1-20П. Расстояние между сейсмоприемниками – 2 м. Сейсмоприемники устанавливались в специально пробуренные шпурки нормально стенке выработки. Высота расположения приборов составляла от 1,2 до 1,5 м от подошвы выработки.

При изучении формирования поля упругих колебаний в восточном блоке Краснослободского рудника были использованы геологические материалы по скважине № 747, в западном блоке – по скважине № 965г, которые находятся наиболее близко к участку проведения геофизических исследований.

Проходка разведочных выработок № 5 и № 6 главного северо-западного направления Третьего калийного горизонта осуществлялась из 13-й сильвинитовой пачки восточного блока Краснослободского рудника 2 РУ, а после пересечения разломной зоны К-С разлома продолжалась в западном блоке Краснослободского рудника 2 РУ в пределах верхней части 11-й соляной пачки.

По результатам сейсмических исследований построены глубинный разрез МОГТ (рисунок 3) и сейсмический разрез МОВ (рисунок 4). На сейсмических разрезах выделяются три участка профиля: первый – до разломной КЗР, второй – зона влияния Краснослободского разлома и третий – после КЗР.

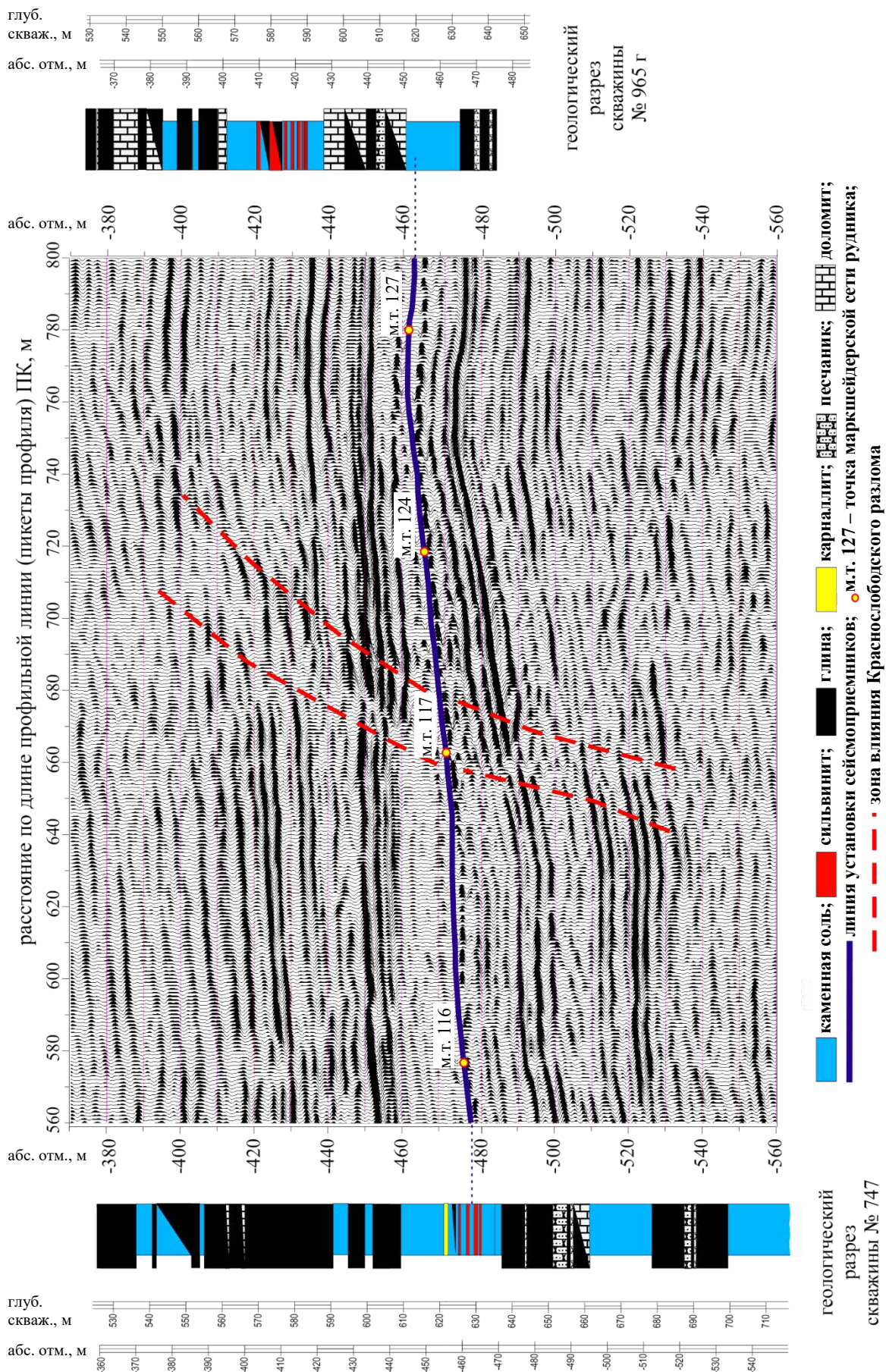


Рисунок 3. – Глубинный разрез МОГТ

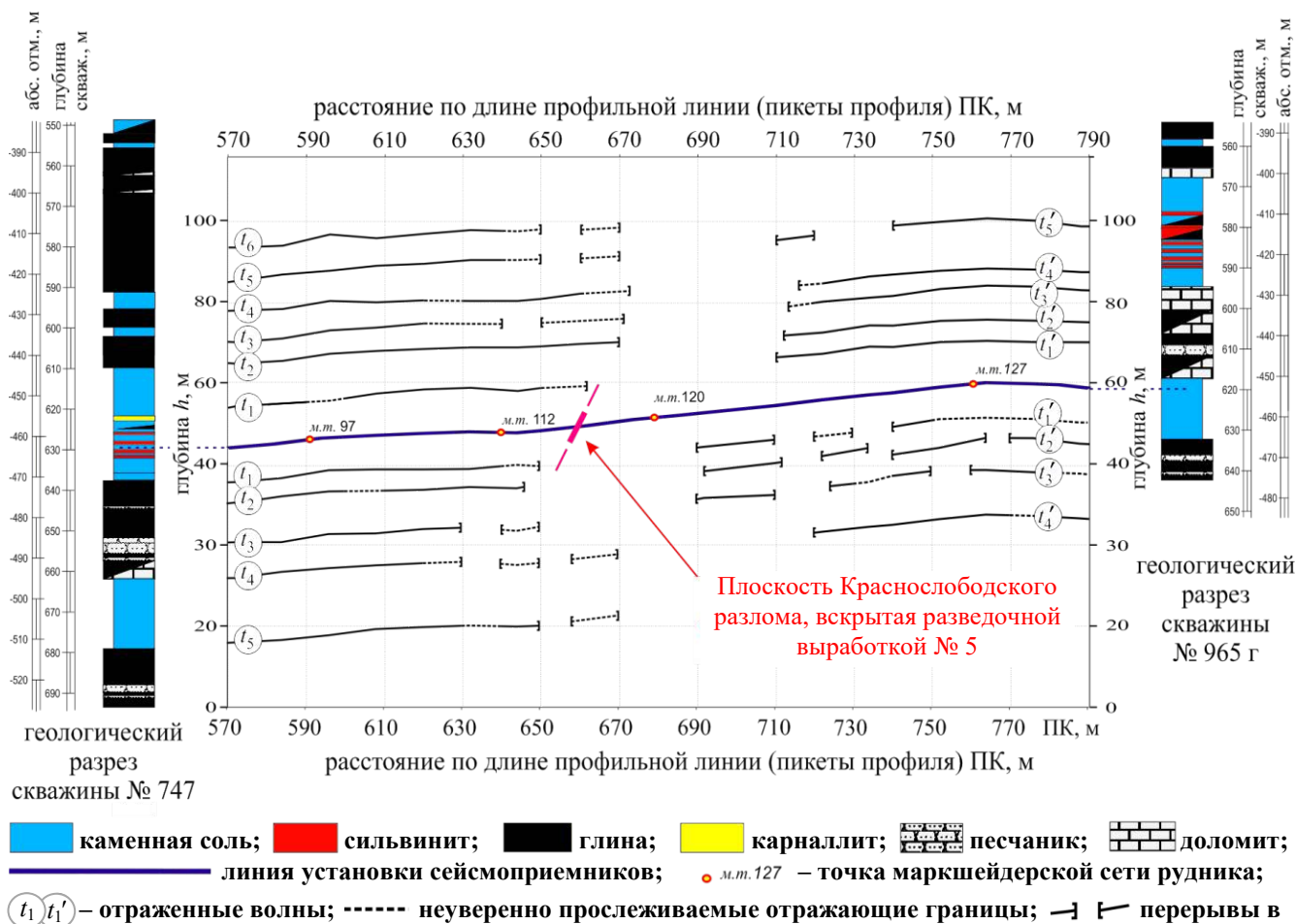


Рисунок 4. – Сейсмический разрез МОВ

На первом участке профиля все группы отраженных волн ведут себя устойчиво и достаточно выдержаны по глубинам залегания. По мере приближения к Краснослободскому разлому наблюдается изменение геометрии залегания слоев, что выражается углами наклона и сложными криволинейными формами.

Зона влияния Краснослободского разлома выделена на ПК 630-740 сейсмического профиля по разведочной выработке № 5. Данный участок характеризуется неоднородностью и сложным строением. В поле отраженных волн этот участок профиля выделяется смещением опорных осей синфазности, резким затуханием амплитуд, появлением коротких осей синфазности – отраженных волн плоскости разлома. Наблюдается прекращение корреляции и осложнения в прослеживании всех групп отраженных волн.

С ПК 740 и до конца сейсмических профилей по разведочной выработке № 5 отражающие границы в толще пород, покрывающих Третий калийный горизонт, выделяются достаточно уверенно.

Шахтные исследования методом сеймопросвечивания и методом дипольного электропрофилирования в режиме электропросвечивания выполнялись между разведочными выработками № 5 и № 6 с целью определения возможности проходки главного северо-западного транспортного штрека № 2 между разведочными выработками № 5 и № 6 из 13-й соляной в 11-ю соляную пачку.

При изучении данного блока методом сеймопросвечивания определялись кинематические и динамические характеристики поля упругих колебаний. Для

количественной оценки строения массива соляных пород использовались следующие параметры: скорость продольной Р-волны, частота продольной Р-волны, энергия Р-волны, значения амплитуд Р-волны, нормированные по длине сейсмических лучей [2].

На основании количественной оценки значений параметров поля упругих колебаний различными математическими алгоритмами (методом обратного проецирования – МОП, методом одновременного итерационного восстановления – МОИВ, методом суммирования разностей – МСР) по каждому блоку строились томографические сечения, представляющие собой двумерный срез массива соляных пород между двумя горными выработками. При этом производилась дискретизация массива элементарными ячейками размером 2 м × 2 м.

На томографических сечениях, построенных МОП для коэффициента поглощения-рассеяния по значениям амплитуд Р-волны, нормированных по длине сейсмических лучей (рисунок 5), выделяется одна зона с контрастными значениями коэффициентов поглощения-рассеяния.

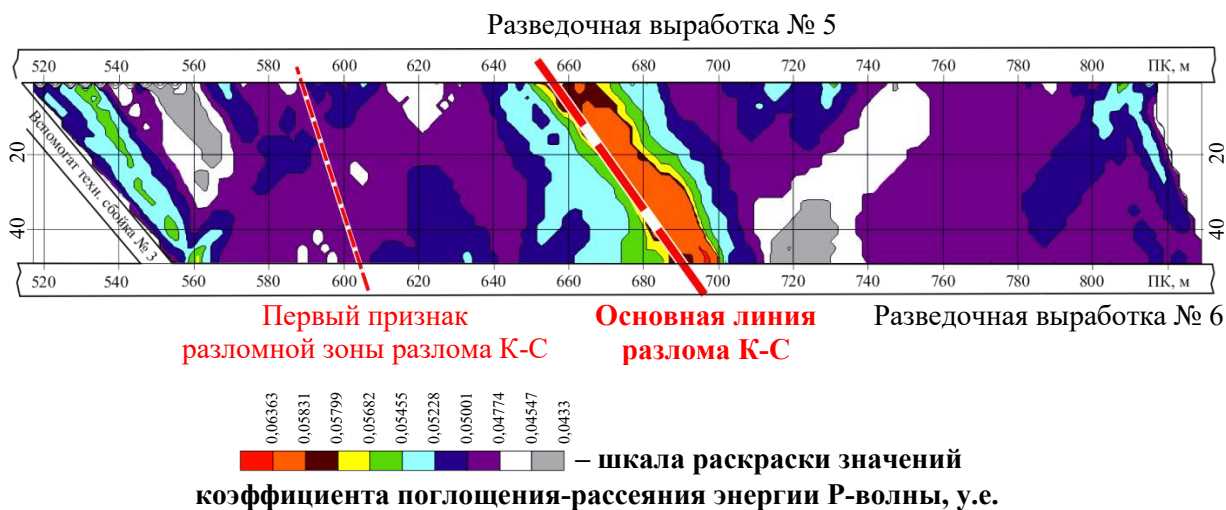


Рисунок 5. – Томографическое сечение участка исследований блока горных пород между разведочной выработкой № 5 и разведочной выработкой № 6 в районе перехода Краснослободского разлома, построенное по коэффициенту поглощения-рассеяния энергии Р-волны, нормированному по длине сейсмических лучей (длина лучей от 51 до 70 м, пункты приема расположены в разведочной выработке № 6, пункты возбуждения – в разведочной выработке № 5)

Эта зона, с повышенными значениями коэффициента поглощения-рассеяния Р-волны, расположена полосой в районе ПК 650-670 по разведочной выработке № 5 и ПК 675-700 по разведочной выработке № 6 и объясняется наличием на уровне соляных пород геологических нарушений, вскрытых разведочными выработками № 5 и № 6 (основной плоскости сброса Краснослободского разлома и антиклинальной складки в поднятом (западном) блоке). Этот участок характеризуется: отличными от горизонтальных углами залегания соляных пород, невыдержанными по мощностям слоями, повышенной трещиноватостью горных пород, появлением в горных выработках брекчированных пород и массивной глины.

За исключением описанной выше зоны, примыкающей к разлому К-С, остальная часть изучаемого блока выглядит довольно равномерно по значениям коэффициента поглощения-рассеяния сейсмической Р-волны, что позволило сделать вывод об отсутствии в массиве между разведочными выработками № 5 и № 6 других зон, которые

могли создать осложнения при проходке главного северо-западного транспортного штрека № 2.

Томографические сечения участка исследования, восстановленные алгоритмом МОП, строились также по значениям частот Р-волны (рисунок 6).

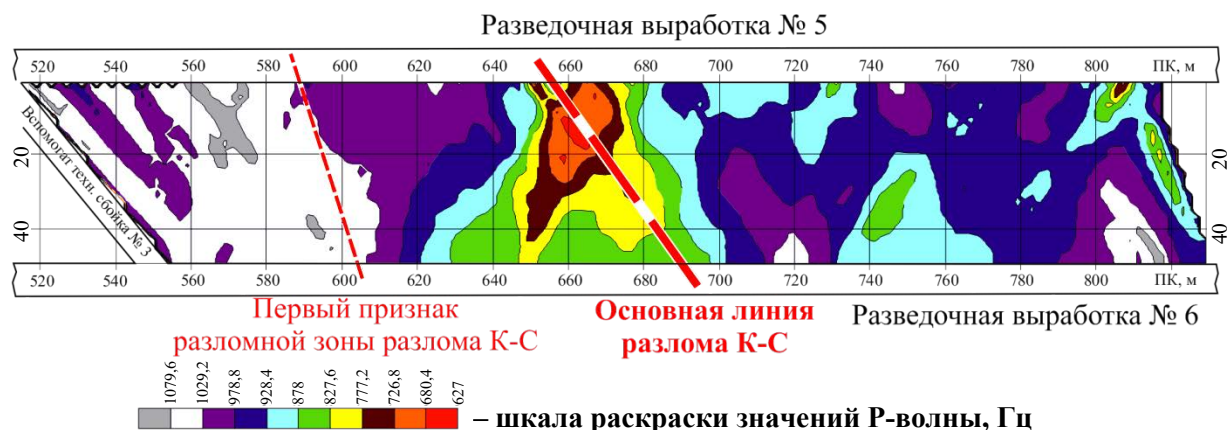


Рисунок 6. – Томографическое сечение участка исследований блока горных пород между разведочной выработкой № 5 и разведочной выработкой № 6 в районе перехода Краснослободского разлома, построенное по значениям частот Р-волны (длина лучей от 51 до 70 м, пункты приема расположены в разведочной выработке № 6, пункты возбуждения – в разведочной выработке № 5)

Как видно из рисунка 6, в пределах сечений выделяется зона с пониженными значениями частот (560-800 Гц), которая расположена в полосе ПК 650-675 по разведочной выработке № 5 и ПК 650-690 по разведочной выработке № 6. Данная аномалия связана с геологически осложненной зоной, примыкающей к разлому К-С. Другие небольшие по размеру зоны пониженных и повышенных значений частот приурочены к контурам выработок и связаны с условиями возбуждения и приема упругих колебаний.

На основании компьютерной обработки экспериментальных данных и анализа томографических сечений, построенных по значениям различных волновых параметров, был сделан вывод об отсутствии (за исключением участка, примыкающего к разлому К-С) зон аномального геологического строения в пределах участка исследований, которые могли создать осложнения при проходке главного северо-западного транспортного штрека № 2.

Электроразведочные работы в КЗР на участке его пересечения горными выработками выполнялись комплексом методов, включающим метод вертикального электротондирования (симметричной установкой) и дипольного электропрофилирования в режиме электропросвечивания массива горных пород между разведочными выработками № 5 и № 6. Результаты электроразведочных работ методом дипольного электропрофилирования представлены на рисунке 7.

При проведении электроразведочных исследований использовались параллельная и экваториальная дипольные установки. При использовании параллельной установки ее ось располагалась по двум направлениям: параллельно простиранию основного скола разлома К-С и вкрест линии простирания основного скола разлома К-С.

При использовании экваториальной установки ее ось располагалась перпендикулярно разведочным выработкам № 5 и № 6. При таком расположении установок массив горных пород в каждой точке профилирования изучался с трех различных направлений (по трем «лучам»). Здесь необходимо отметить, что отнесение данных измерений к массиву горных пород между выработками достаточно условно, так как при электро-

метрических исследованиях изучению подвергается и массив пород, покрывающих и подстилающих горные выработки. При проведении исследований измерительный диполь MN располагался в разведочной выработке № 6, а питающий – в разведочной выработке № 5. Шаг профилирования составлял 10 м.

В результате работ метода электропросвечивания были получены графики значений кажущихся удельных электрических сопротивлений ρ_k для различных установок профилирования и построено продольное сечение массива горных пород между разведочными выработками № 5 и № 6. Для выделения различных аномалий и уровня измеряемых электрических полей графики значений кажущихся удельных электрических сопротивлений построены в логарифмическом и линейном масштабах.

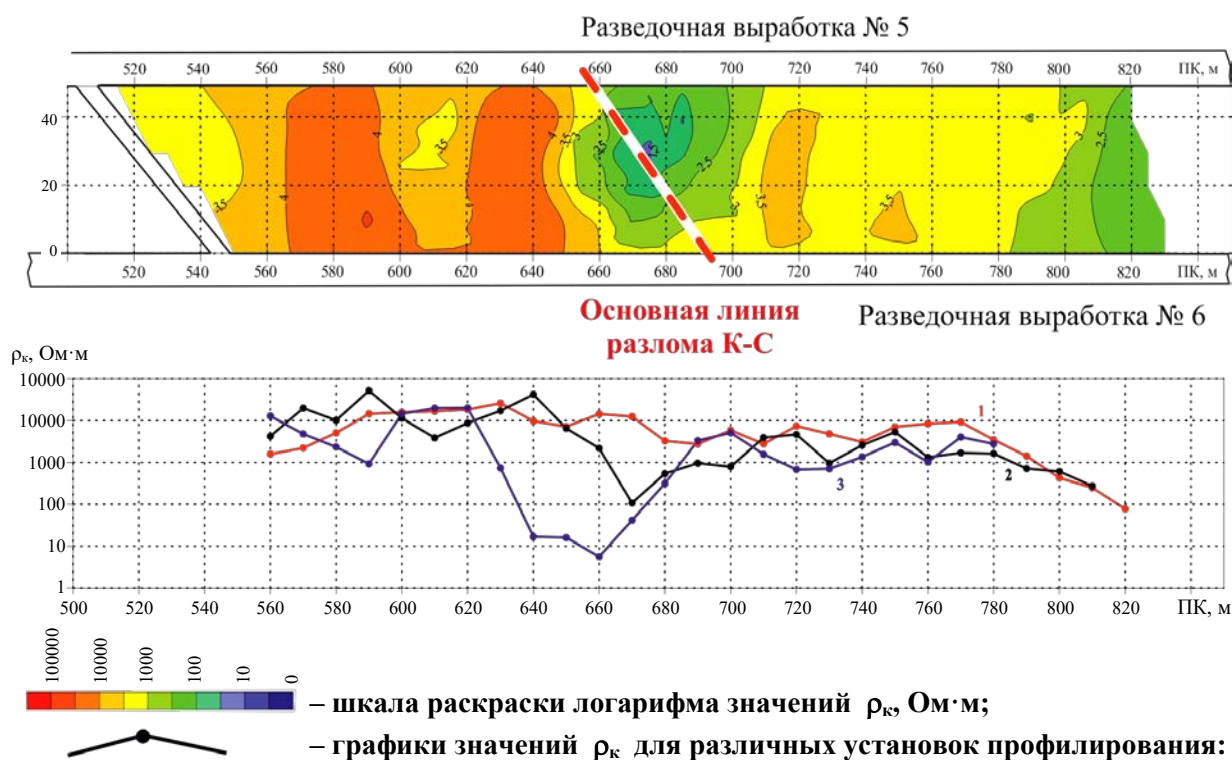


Рисунок 7. – Результаты подземных электроразведочных работ методом электропросвечивания (дипольного электропрофилирования) между разведочными выработками № 5 и № 6

Построение продольного сечения массива горных пород между разведочными выработками № 5 и № 6 выполнялось аналогично сейсмическому методу лучевой томографии по трем направлениям (лучам) установок профилирования. При построении сечения использовался десятичный логарифм значений кажущихся удельных электрических сопротивлений.

Результаты работ методом электропросвечивания показывают, что в полях сопротивлений (аналогично методу продольного вертикального электрического зондирования) изучаемый массив горных пород разделяется на два участка. Первый участок более высоких сопротивлений, расположенный в восточном блоке соляных пород, и участок пониженных сопротивлений на западном блоке шахтного поля, после пересечения про-

филем исследований основного скола разлома К-С. Изменение в полях сопротивлений выделяется по графику значений сопротивлений ρ_k и на продольном сечении блока горных пород между разведочными выработками № 5 и № 6. Такое снижение сопротивлений вызвано, в первую очередь, изменением литологического состава пород вмещающих горные выработки. После перехода профильной линии через линию основного разлома К-С на западный блок шахтного поля на результаты электрометрических измерений начинают оказывать значительное влияние породы низкоомных комплексов 10-й и 12-й глинистых пачек.

Наиболее значительной аномалией по всему блоку изучаемых пород является аномальная зона, выделяемая на пикетах профиля ПК 650-690. Данная аномальная зона приурочена к основному сколу разлома К-С и наиболее контрастно выделяется по графику значений сопротивлений ρ_k и на продольном сечении участка исследований. В полях электросопротивлений область основного скола разлома К-С выделяется в виде аномалии значительного понижения значений сопротивлений ρ_k , что характерно для такого типа нарушений, выполненных глинисто-соляной брекчией.

В результате применения комплекса работ электрометрическими методами было установлено, что аномалий пониженных значений сопротивлений, связанных с повышенным рассолонасыщением пород, вмещающих Третий калийный горизонт, по разрезу изучаемой толщи пород участка исследований не выделено.

В результате шахтных геофизических исследований изучено состояние массива горных пород и сделано заключение о возможности проходки главного северо-западного транспортного штрека № 2 между разведочными выработками № 5 и № 6 из 13-й соляной в 11-ю соляную пачку.

Выводы. В результате шахтных геофизических исследований, проведенных в горных выработках, пересекающих Краснослободскую зону разломов Краснослободского рудника 2 РУ ОАО «Беларуськалий» на уровне Третьего калийного горизонта, изучено строение разломной зоны. Сейсмическими методами изучено формирование волнового поля упругих колебаний в соленосной толще в районе КЗР, определены критерии выявления разломов на сейсмограммах МОВ и сейсмических разрезах МОГТ (смещение осей синфазности, затухание сейсмического сигнала в области повышенной трещиноватости, сопутствующей разлому, изменение амплитудно-частотных характеристик, наличие наклонных отражающих элементов, выделение линий смещений, сбросов, взбросов и т.д.). Электрометрическими методами изучено строение и состояние блока соляных пород КЗР в полях электросопротивлений. Выполненные исследования показывают хорошую результативность шахтных геофизических методов для изучения строения, конфигурации, протяженности и пространственного положения разломов в соленосной толще.

На основании результатов применения методов подземной геофизики выдавались рекомендации для безопасного ведения горных работ на рудниках ОАО «Беларуськалий» Старобинского месторождения калийных солей.

Выполненный комплекс работ является уникальным: впервые на Старобинском месторождении калийных солей крупный блокообразующий разлом был пересечен в сопровождении комплекса шахтных геофизических исследований.

Список использованных источников

1. Применение геофизических методов в горных выработках Старобинского месторождения калийных солей при поисках и картировании малоамплитудных

нарушений разрывного типа / В.Б. Вагин [и др.] // Маркшейдерия и недропользование. – 2004. – № 1. – С. 47-49.

2. Вагин, В.Б. Шахтные сейсмические методы изучения строения массивов соляных пород / В.Б. Вагин. – Минск: БелНИЦ «Экология», 2010. – 188 с.

Информация об авторах

Игорь Федорович Ущачовский – ведущий инженер научно-исследовательского отдела инженерной геофизики, ОАО «Белгорхимпром» (ул. Козлова, 31а, 223710, г. Солигорск, Беларусь), e-mail: iuschapovsky@bmci.by.

Татьяна Петровна Кафанова – старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела инженерной геофизики, ОАО «Белгорхимпром» (ул. Козлова, 31а, 223710, г. Солигорск, Беларусь), e-mail: tkafanova@bmci.by.

Николай Николаевич Прохоров – кандидат технических наук, заведующий научно-исследовательским отделом инженерной геофизики, ОАО «Белгорхимпром» (ул. Козлова, 31а, 223710, г. Солигорск, Беларусь), e-mail: nprochorov@bmci.by.

Александр Михайлович Ефимов – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского отдела инженерной геофизики, ОАО «Белгорхимпром» (ул. Козлова, 31а, 223710, г. Солигорск, Беларусь), e-mail: aefimov@bmci.by.

Information about the authors

Igor Fyodorovich Ushchapousky – Senior Engineer of the Research Department of Engineering Geophysics of JSC “Belgorkhimprom” (31a, Kozlova Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: iuschapovsky@bmci.by.

Tatsiana Petrovna Kafanova – Senior Researcher of the Research Department of Engineering Geophysics of JSC “Belgorkhimprom” (31a, Kozlova Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: tkafanova@bmci.by.

Nikolay Nikolaevich Prohorov – PhD in Engineering sciences, Head of the Research Department of Engineering Geophysics of JSC “Belgorkhimprom” (31a, Kozlova Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: nprochorov@bmci.by.

Alexander Michaylovich Efimov – PhD in Geologo-mineralogical sciences, Leading Researcher of the Research Department of Engineering Geophysics of JSC “Belgorkhimprom” (31a, Kozlova Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: aefimov@bmci.by.

Поступила в редакцию 27.07.2021 г.

УДК 51-74,539.319,531.3,539.41

М.А. Журавков, М.А. Николайчик*Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь***КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ПОДЪЕМНОГО СОСУДА С КОНСТРУКТИВНЫМИ
ЭЛЕМЕНТАМИ ШАХТНОГО СТВОЛА**

Аннотация. В статье рассмотрена задача построения адекватной компьютерной модели системы «подъемный сосуд – металлоконструкции шахтного ствола» и выполнения модельных исследований по взаимовлиянию выделенных конструкций при движении подъемного сосуда. Разработаны подробные твердотельная и конечно-элементная модели конструкций шахтного ствола в соответствии с проектными решениями. При компьютерном моделировании учитываются нагрузки в области контакта проводников с направляющими роликами, полученные в результате решения дополнительной модельной задачи. Составлена программа конечно-элементного расчета напряженно-деформированного состояния системы «проводники – расстрелы». Полученные результаты позволяют изучать напряженно-деформированное состояние в проводниках и элементах армировки ствола при движении подъемного сосуда, что, в свою очередь, позволяет делать заключения о состоянии (прочности, износе) элементов металлоконструкций шахтного ствола.

Ключевые слова: *скап, шахтный ствол, армировка, проводники, расстрелы, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние.*

M.A. Zhuravkov, M.A. Nikolaitchik*Belarusian State University, Minsk, Belarus***FINITE ELEMENT MODELING OF THE LIFTING VESSEL INTERACTION
WITH THE MINE SHAFT STRUCTURAL ELEMENTS**

Abstract. The article deals with the problem of lifting vessel with the mine shaft main elements interaction modeling. Mine shaft structures detailed solid and finite element models have been developed in accordance with design solutions for adequate and reliable modeling. Computer simulation takes into account the loads in the conductors with the guide rollers contact area, obtained as a result of an additional model problem solution. A program for the stress-strain state finite element calculation of the “conductors-buntions” system has been compiled. The results obtained make it possible to study conductors and elements of the shaft reinforcement stress-strain state during the lifting vessel movement which in turn makes it possible to make conclusion about the mine shaft metal structure elements state (strength, wear).

Keywords: *skip, mine shaft, reinforcement, conductors, buntions, finite element method, stress-strain state.*

Введение. На сегодняшний день проблема оценки состояния конструктивных элементов шахтного ствола вследствие их активного взаимодействия с подъемным сосудом является крайне актуальной и, вместе с тем, не имеющей однозначного решения. Данной проблематике в научно-технической литературе уделяется достаточно много внимания (например, [1-5]). Построение корректного решения связано со сложностью и конструкционными особенностями как собственно исследуемой геотехнической системы, так и проблемой выбора базовых механико-математических моделей, а также неопределенностью в начальных условиях и параметрах.

Авторами данной статьи ранее была рассмотрена задача определения параметров силового взаимодействия подъемного сосуда (в частности, скипа) с элементами металлоконструкций ствола. Были разработаны соответствующие механико-математические модели движения скипа, основанные на использовании различных входных параметров, таких как данные ускорений, поступающие с системы мониторинга плавности движения SLUCH, созданной в ООО «ПассатИнновации» и установленной на одном из стволов ОАО «Беларуськалий», а также на данных профилировки проводников, полученных путем маркшейдерской съемки [6-9].

После нахождения величин силового взаимодействия подъемного сосуда с проводниками необходимо рассмотреть задачу о том, какие значения силовой нагрузки являются опасными с точки зрения вероятности появления значительных деформаций в элементах металлоконструкций ствола и последующей потерей их несущей способности.

Целью исследований, представленных в данной статье, являлось создание конечно-элементной модели движения подъемного сосуда (скипа), а также разработка программы конечно-элементного расчета величин абсолютных деформаций проводников и углов их поворота, используя данные известных усилий со стороны скипа на проводники.

Конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «скип – конструктивные элементы ствола». Рассмотрим задачу построения компьютерной модели движения скипа. При этом используем типовые проектные решения применительно к условиям ОАО «Беларуськалий». Твердотельная модель части ствола с рассматриваемым отделением скипового подъема приведена на рисунке 1.

В качестве граничных условий принимаем условия жесткого закрепления по всем степеням свободы устья и зумпфа ствола. Силовая нагрузка на проводники моделирует воздействие направляющих роликов при движении скипа. Таким образом, важно, что нагрузка на проводники зависит от положения скипа в стволе и от времени. Величины нагрузок в лобовом и боковом направлениях определяются в соответствии с ранее разработанным алгоритмом по данным профилировки проводников, полученных путем маркшейдерской съемки [7].

Материалом для проводников и расстрелов выбрана сталь 09Г2С, а для тубинговой колонны – чугун СЧ25. При расчетах принимается упругая модель поведения материала проводников и чугуна.

Основные геометрические характеристики исследуемой геотехнической системы: диаметр ствола – 8 м, сечение расстрелов – $210 \times 135 \times 12$ мм, проводники коробчатого сечения $180 \times 180 \times 12$ мм.

В качестве примера рассмотрим промежуток времени в 11 секунд с начала движения скипа.

Расстояние, пройденное скипом за это время, с учетом участка разгона до рабочей скорости (6 м/с), составляет примерно 50 метров. На рисунках 2-4 представлены некоторые результаты конечно-элементного моделирования.

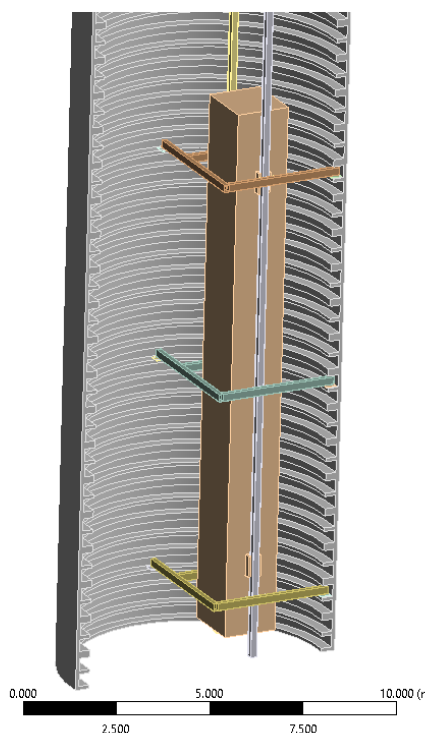


Рисунок 1. – Твердотельная модель скипового ствола

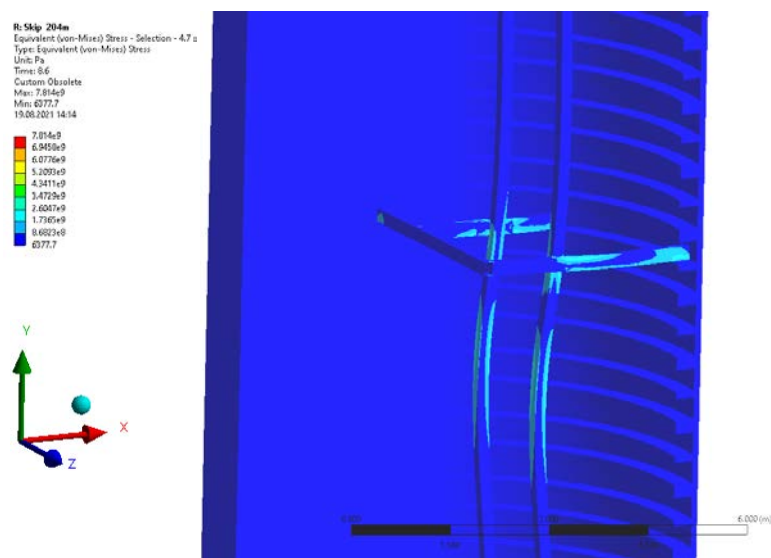


Рисунок 2. – Эквивалентные напряжения конструкций ствола в момент времени $t = 8,6$ секунды

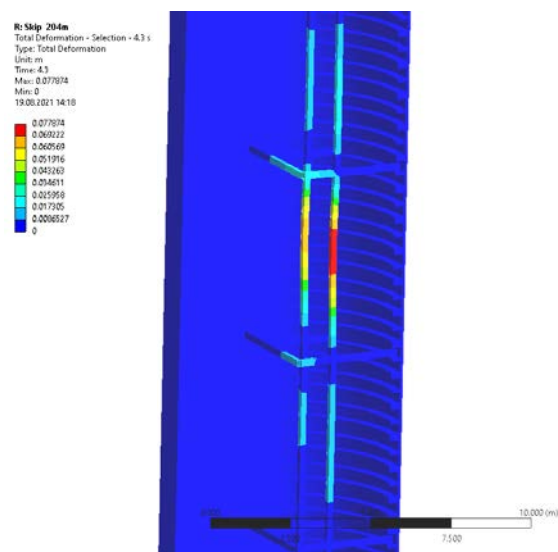


Рисунок 3. – Полные перемещения конструкций ствола в момент времени $t = 4,3$ секунды

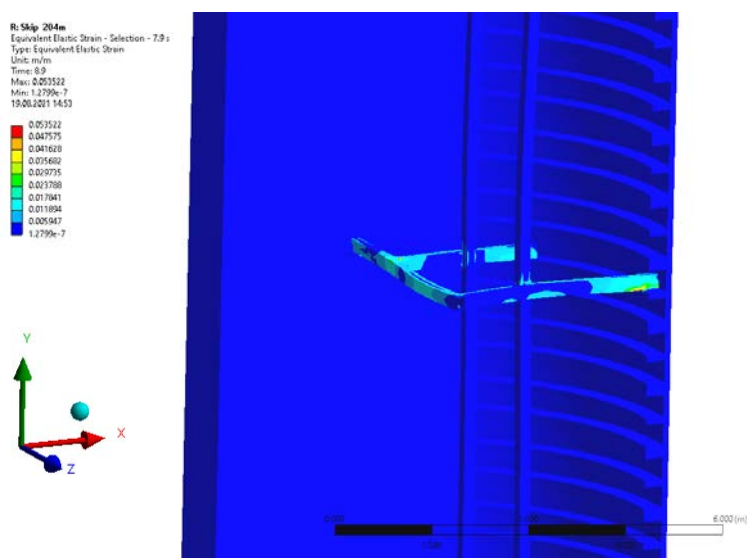


Рисунок 4. – Эквивалентные упругие деформации конструкций ствола в момент времени $t = 8,9$ секунды

Итак, построена конечно-элементная модель, позволяющая выполнять оценку НДС в элементах металлоконструкций и тюбинговой крепи ствола при движении подъемного сосуда в каждый момент времени. Используя данную модель и статистику о состоянии элементов металлоконструкций и тюбинговой крепи при движении подъемного сосуда в качестве верификационных данных, можно перейти к модели долговременного износа элементов крепления шахтного ствола.

Определение НДС системы «проводники – расстрелы» при силовом воздействии со стороны скипа. Рассмотрим задачу определения НДС в проводниках и расстрелах на базе построения соответствующей конечно-элементной модели. Конструктивные особенности системы «проводники – расстрелы» позволяют рассматривать ее как ферму [10], к узлам которой приложена нагрузка, симулирующая воздействие со стороны скипа при его движении. В качестве входных данных принимаются: координаты каждого из узлов мест соединения проводников, модули упругости и площади поперечного сечения проводников и расстрелов, величины сосредоточенной нагрузки, определяемой силой контактного взаимодействия скипа с проводниками.

Расчетная схема системы «проводник – расстрелы» при силовом воздействии со стороны движущегося скипа, моделируемая как ферма, представлена на рисунке 5.

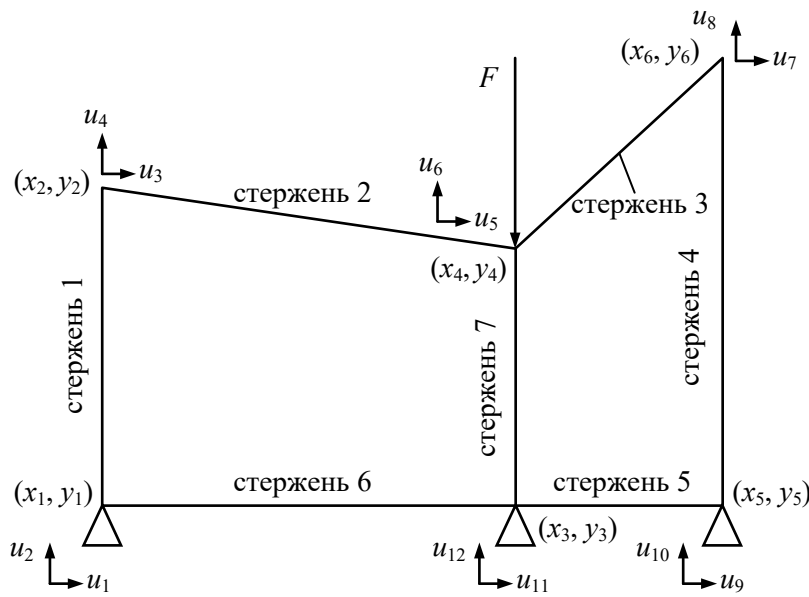


Рисунок 5. – Расчетная схема системы
«проводник – расстрелы»

Выбор данной расчетной схемы обусловлен конструктивными особенностями армировки шахтного ствола. На данной схеме стержни 1, 4, 7 можно рассматривать в качестве расстрелов; стержни 2, 3 – в качестве проводников, стержни 5, 6 принимаются за тубинговую (бетонную) крепь.

Для удобства описания алгоритм построения конечно-элементной модели в общем виде.

Прежде чем перейти к глобальной матрице жесткости, необходимо получить матрицы жесткости

для каждого стержня фермы [11]. В формулах (1), (2) приведен пример построения матриц жесткости для двух стержней.

$$\left(\begin{array}{cccc} \frac{AEn(-x_1+x_2)^2}{((-x_1+x_2)^2+(-y_1+y_2)^2)^{3/2}} & \frac{AEn(-x_1+x_2)(-y_1+y_2)}{((-x_1+x_2)^2+(-y_1+y_2)^2)^{3/2}} & -\frac{AEn(-x_1+x_2)^2}{((-x_1+x_2)^2+(-y_1+y_2)^2)^{3/2}} & -\frac{AEn(-x_1+x_2)(-y_1+y_2)}{((-x_1+x_2)^2+(-y_1+y_2)^2)^{3/2}} \\ \frac{AEn(-x_1+x_2)(-y_1+y_2)}{((-x_1+x_2)^2+(-y_1+y_2)^2)^{3/2}} & \frac{AEn(-y_1+y_2)^2}{((-x_1+x_2)^2+(-y_1+y_2)^2)^{3/2}} & -\frac{AEn(-x_1+x_2)(-y_1+y_2)}{((-x_1+x_2)^2+(-y_1+y_2)^2)^{3/2}} & -\frac{AEn(-y_1+y_2)^2}{((-x_1+x_2)^2+(-y_1+y_2)^2)^{3/2}} \\ -\frac{AEn(-x_1+x_2)^2}{((-x_1+x_2)^2+(-y_1+y_2)^2)^{3/2}} & -\frac{AEn(-x_1+x_2)(-y_1+y_2)}{((-x_1+x_2)^2+(-y_1+y_2)^2)^{3/2}} & \frac{AEn(-x_1+x_2)^2}{((-x_1+x_2)^2+(-y_1+y_2)^2)^{3/2}} & \frac{AEn(-x_1+x_2)(-y_1+y_2)}{((-x_1+x_2)^2+(-y_1+y_2)^2)^{3/2}} \\ -\frac{AEn(-x_1+x_2)(-y_1+y_2)}{((-x_1+x_2)^2+(-y_1+y_2)^2)^{3/2}} & -\frac{AEn(-y_1+y_2)^2}{((-x_1+x_2)^2+(-y_1+y_2)^2)^{3/2}} & \frac{AEn(-x_1+x_2)(-y_1+y_2)}{((-x_1+x_2)^2+(-y_1+y_2)^2)^{3/2}} & \frac{AEn(-y_1+y_2)^2}{((-x_1+x_2)^2+(-y_1+y_2)^2)^{3/2}} \end{array} \right) \quad (1)$$

$$\left(\begin{array}{cccc} \frac{AEn(-x_2+x_4)^2}{((-x_2+x_4)^2+(-y_2+y_4)^2)^{3/2}} & \frac{AEn(-x_2+x_4)(-y_2+y_4)}{((-x_2+x_4)^2+(-y_2+y_4)^2)^{3/2}} & -\frac{AEn(-x_2+x_4)^2}{((-x_2+x_4)^2+(-y_2+y_4)^2)^{3/2}} & -\frac{AEn(-x_2+x_4)(-y_2+y_4)}{((-x_2+x_4)^2+(-y_2+y_4)^2)^{3/2}} \\ \frac{AEn(-x_2+x_4)(-y_2+y_4)}{((-x_2+x_4)^2+(-y_2+y_4)^2)^{3/2}} & \frac{AEn(-y_2+y_4)^2}{((-x_2+x_4)^2+(-y_2+y_4)^2)^{3/2}} & -\frac{AEn(-x_2+x_4)(-y_2+y_4)}{((-x_2+x_4)^2+(-y_2+y_4)^2)^{3/2}} & -\frac{AEn(-y_2+y_4)^2}{((-x_2+x_4)^2+(-y_2+y_4)^2)^{3/2}} \\ -\frac{AEn(-x_2+x_4)^2}{((-x_2+x_4)^2+(-y_2+y_4)^2)^{3/2}} & -\frac{AEn(-x_2+x_4)(-y_2+y_4)}{((-x_2+x_4)^2+(-y_2+y_4)^2)^{3/2}} & \frac{AEn(-x_2+x_4)^2}{((-x_2+x_4)^2+(-y_2+y_4)^2)^{3/2}} & \frac{AEn(-x_2+x_4)(-y_2+y_4)}{((-x_2+x_4)^2+(-y_2+y_4)^2)^{3/2}} \\ -\frac{AEn(-x_2+x_4)(-y_2+y_4)}{((-x_2+x_4)^2+(-y_2+y_4)^2)^{3/2}} & -\frac{AEn(-y_2+y_4)^2}{((-x_2+x_4)^2+(-y_2+y_4)^2)^{3/2}} & \frac{AEn(-x_2+x_4)(-y_2+y_4)}{((-x_2+x_4)^2+(-y_2+y_4)^2)^{3/2}} & \frac{AEn(-y_2+y_4)^2}{((-x_2+x_4)^2+(-y_2+y_4)^2)^{3/2}} \end{array} \right) \quad (2)$$

Общая размерность глобальной матрицы жесткости составляет 12×12 . Это связано с тем, что стержневая конструкция имеет 6 узлов и эти узлы имеют два перемещения по координатным осям.

Принимаем следующие значения исходных данных.

Координаты узлов, м: $x_1 = 0$; $y_1 = 0$; $x_2 = 0$; $y_2 = 0,05$; $x_3 = 0,06$; $y_3 = 0$; $x_4 = 0,06$; $y_4 = 0,04$; $x_5 = 0,09$; $y_5 = 0$; $x_6 = 0,09$; $y_6 = 0,07$.

Площадь поперечного сечения стержней: $A = 0,008 \text{ м}^2$.

Модуль упругости: $E = 210 \text{ ГПа}$.

Приложенная нагрузка: $F = 1000 \text{ кН}$.

Данные значения параметров выбирались с целью большей наглядности графиков перемещений.

Анализируя исходные данные (рисунок 5), видно, что ферма жестко закреплена в узлах 1, 3 и 5, которые представляют собой область закрепления расстрелов в тубинговой крепи, либо в бетонной колонне. Поэтому принимаем относительные перемещения в этих узлах равными 0. Исключая строки с нулевыми перемещениями, получаем такую глобальную матрицу жесткости:

$$\begin{pmatrix} 2,68726 \cdot 10^{10} & -4,47876 \cdot 10^9 & -2,68726 \cdot 10^{10} & 4,47876 \cdot 10^9 & 0 & 0 \\ -4,47876 \cdot 10^9 & 3,43465 \cdot 10^{10} & 4,47876 \cdot 10^9 & -7,4646 \cdot 10^8 & 0 & 0 \\ -2,68726 \cdot 10^{10} & 4,47876 \cdot 10^9 & 4,66716 \cdot 10^{10} & 1,53202 \cdot 10^{10} & -1,9799 \cdot 10^{10} & -1,9799 \cdot 10^{10} \\ 4,47876 \cdot 10^9 & -7,4646 \cdot 10^8 & 1,53202 \cdot 10^{10} & 6,25455 \cdot 10^{10} & -1,9799 \cdot 10^{10} & -1,9799 \cdot 10^{10} \\ 0 & 0 & -1,9799 \cdot 10^{10} & -1,9799 \cdot 10^{10} & 1,9799 \cdot 10^{10} & 1,9799 \cdot 10^{10} \\ 0 & 0 & -1,9799 \cdot 10^{10} & -1,9799 \cdot 10^{10} & 1,9799 \cdot 10^{10} & 4,3799 \cdot 10^{10} \end{pmatrix} \quad (3)$$

В результате строится система линейных алгебраических уравнений вида: $KU = F$, где K – глобальная матрица жесткости, U – вектор перемещений, F – вектор приложенных нагрузок.

Решив систему линейных алгебраических уравнений, определяем перемещения и углы поворота конечных элементов.

На рисунке 6 приведена сравнительная картина перемещений проводников и расстрелов в деформированном и исходном (недеформированном) состояниях.

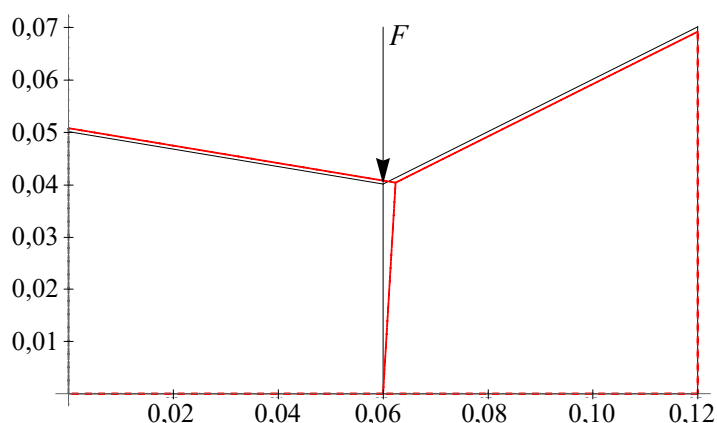


Рисунок 6. – Геометрия деформированной и недеформированной системы

На основе описанного алгоритма разработана программа выполнения конечно-элементных расчетов для системы с произвольным количеством узлов и произвольным количеством приложенных сил. Так, на рисунке 7 приведены результаты расчета для системы с восемью узлами и двумя приложенными нагрузками, что моделирует действие скипа при его движении на элементы армировки в двух точках контакта направляющих роликов с проводниками.

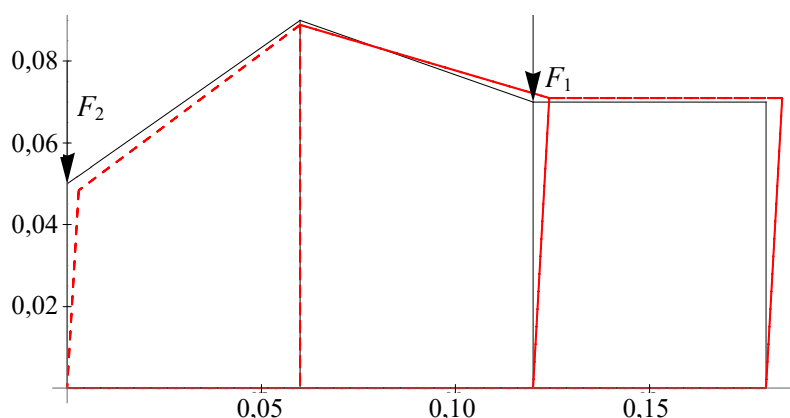


Рисунок 7. – Графики деформированной и недеформированной системы в случае 8 узлов

Разработанный алгоритм и программа конечно-элементного расчета позволяют в полуавтоматическом режиме выполнять расчеты для ферм, состоящих из произвольного количества узлов, а также произвольного количества приложенных нагрузок. Это означает, что его можно использовать для конструкции ствола любого типа.

Закключение. В первой части статьи представлены результаты конечно-элементного анализа силового воздействия со стороны движущегося скипа на элементы конструкций шахтного ствола. Конечно-элементная модель рассматриваемой задачи разработана в соответствии с проектными конструкционными решениями. В качестве примера приведены результаты выполненных расчетов характеристик напряженно-деформируемого состояния элементов системы при движении скипа при конкретных выбранных начальных параметрах. Величины нагрузок определялись с использованием ранее разработанной механико-математической модели, учитывающей информацию об актуальной профилировке проводников одного из стволов ОАО «Беларуськалий».

Во второй части описан алгоритм, на основе которого составлен программный код метода конечных элементов для определения НДС системы «проводники – расстрелы» с приложенными усилиями, имитирующими воздействие со стороны скипа. Предложенный алгоритм позволяет оценить основные характеристики НДС проводников и расстрелов с малыми затратами времени расчетов и памяти, в отличие от подхода, предложенного в первой части, требующего выполнения длительных и ресурсоемких расчетов. В тоже время первый из описанных подходов позволяет построить более точную модель «подъемный сосуд – конструкционные элементы ствола» и определить больший набор расчетных параметров.

Представленные в статье модели, позволяющие выполнять оценку влияния движущегося подъемного сосуда на состояние конструкционных элементов шахтного ствола, могут быть использованы при построении более точных сложных моделей шахтных подъемов.

В тоже время, на базе данных моделей можно выполнять расчеты, связанные с повышением степени надежности и безопасной эксплуатации шахтных стволов, путем оценки состояния его элементов и выполнения модельного анализа, а не только визуального осмотра.

Список использованных источников

1. Kuznetsov, N.K. Reduction of Dynamic Loads in Mine Lifting Installations / N.K. Kuznetsov, S.V. Eliseev, A.Yu. Perelygina // Journal of Physics: Conference Series [Electronic resource]. – 2018. – Mode of access: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35494203>. – Date of access: 12.11.2021.
2. Samusia, V.I. Computer modeling and investigation of dynamics of system “vessel – reinforcement” in shafts with broken geometry / V.I. Samusia, I.S. Iliina, S.S. Iliina // Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining. – 2016. – No. 15 (20). – P. 277-285.

3. Pershin, V. Research in the Impact of Dynamic Loads for the Development of Pentice Designs when Sinking Skip Shafts / V. Pershin, A. Kopytov, A. Wetti // IVth International Innovative Mining Symposium [Electronic resource]. – 2019. – Mode of access: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/31/e3sconf_iims18_01056.pdf. – Date of access: 12.11.2021.
4. Wolny, S. Analysis of loads and stresses in structural elements of hoisting installations in mines / S. Wolny, F. Matachowski // Engineering Transactions. – 2010. – No. 58 (3-4). – P. 153-174.
5. Conceptual bases of intensification of mining operations in mines of Ukraine based on monitoring and condition management of mine hoisting systems / Ilin Serhii [and others] // Essays of Mining Science and Practice [Electronic resource]. – 2019. – Mode of access: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/35/e3sconf_rmget18_00030.pdf. – Date of access: 12.11.2021.
6. Nikolaitchik, M.A. Determination of the skip force effect on guides in mine shaft / M.A. Nikolaitchik // E3S Web of Conferences [Electronic resource]. – 2020. – Mode of access: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2020/61/e3sconf_usme2020_01017.pdf. – Date of access: 12.11.2021.
7. Журавков, М.А. Определение силового взаимодействия скипа с направляющими по данным профилировки проводников / М.А. Журавков, С.С. Хвесеня, М.А. Николайчик // Актуальные вопросы машиноведения. – 2020. – В. 9. – С. 38-41.
8. Zhuravkov, M.A. Analytical model of skip motion taking into account influence of head and balancing ropes / M.A. Zhuravkov, V.P. Savchuk, M.A. Nikolaitchik // Journal of the Belarusian State University. Mathematics and Informatics. – 2021. – № 2. – С. 105-113.
9. Журавков, М.А. Контактная задача взаимодействия направляющего ролика с шахтным проводником / М.А. Журавков, М.А. Николайчик, П.С. Маевский // Механика машин, механизмов и материалов. – 2021. – № 3 (56). – С. 82-88.
10. Дарков, А.В. Строительная механика: учеб. для строит. специал. вузов / А.В. Дарков, Н.Н. Шапошников. – М.: Высшая школа, 1986. – 608 с.
11. Сегерлинд, Л.Дж. Применение методов конечных элементов / Л.Дж. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979. – 393 с.

Информация об авторах

Михаил Анатольевич Журавков – доктор физико-математических наук, профессор; заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь), e-mail: Zhuravkov@bsu.by. 0000-0002-7420-5821 ID ORCID.

Михаил Александрович Николайчик – заведующий НИЛ Прикладной механики, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь), e-mail: Nikolaitchik.m@gmail.com.

Information about the authors

Michael A. Zhuravkov – Doctor of sciences (physics and mathematics), full Professor; Head of theoretical and applied mechanics department, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Belarus), e-mail: Zhuravkov@bsu.by. 0000-0002-7420-5821 ID ORCID.

Mikhail A. Nikolaitchik – Head of the Research laboratory “Applied mechanics”, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Belarus), e-mail: Nikolaitchik.m@gmail.com.

Поступила в редакцию 18.11.2021 г.

УДК 622.28.042-025.71:622.023:622.363.2(476)

Д.А. Диулин

ОАО «Трест Шахтоспецстрой», г. Солигорск, Беларусь

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КРЕПИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ СТАРОБИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

Аннотация. В статье рассмотрены подходы к аналитическому расчету параметров нагружения крепи вертикальных стволов шахт от действия окружающих выработку пород. С использованием математических соотношений, описывающих напряженно-деформированное состояние массива вокруг ствола, изложенных в работах Н.С. Булычева и С.С. Кологривко, рассчитаны нагрузки, воспринимаемые крепью нескольких стволов рудников Старобинского месторождения. Показано, что боковое давление, действующее на наружную поверхность крепи, рассчитанное послойно с учетом пересечения различных по своим физико-механическим свойствам пород, практически линейно зависит от глубины. С использованием данных аналитического расчета произведено двухмерное компьютерное моделирование нагружения крепи, согласно которому полученные значения напряжения в бетонной, чугуновой и кирпичной частях не превышают допустимых значений.

Ключевые слова: вертикальный ствол шахты, параметры нагружения крепи, расчет давления на крепь.

D.A. Diulin

JSC "Trest Shahtospetsstroy", Soligorsk, Belarus

ASSESSMENT OF THE STRESS-STRAIN STATE SUPPORTS OF VERTICAL MINE SHAFTS STAROBINSKY POTASH SALT DEPOSIT

Abstract. The article considers approaches to the analytical calculation of the parameters of the loading of the support of vertical shafts of mines from the action of the rocks surrounding the mine. Using mathematical relations describing the stress-strain state of the massif around the trunk, set out in the works of N.S. Bulychev and S.S. Kologrivko, the loads perceived by the support of several shafts of the mines of the Starobinsky deposit are calculated. It is shown that the lateral pressure acting on the outer surface of the support, calculated in layers taking into account the intersection of rocks with different physical and mechanical properties, depends almost linearly on the depth. Using the analytical calculation data, a two-dimensional computer simulation of the loading of the support was performed, according to which the stress values obtained in the concrete, cast iron and brick parts do not exceed the permissible values.

Keywords: vertical mine shaft, parameters of shaft loading, calculation of the pressure on the mine shaft.

Введение. Одна из основных задач анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) крепи вертикальных шахтных стволов заключается в оценке их несущей способности, основанной на определении напряжений, возникающих в конструкции ствола шахты и сравнении их с допускаемыми значениями.

Горные породы в массиве испытывают объемное всестороннее напряжение, соответственно, тензор напряжений включает следующие компоненты [1, с. 6]:

$$[T_{\sigma}] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – нормальные напряжения, Па;

$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ – касательные напряжения в декартовой системе координат, причем, $\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{xz} = \tau_{zx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}$, Па.

В соответствии с [2-4] аналитический расчет НДС системы «крепь – породный массив» допускает анализ в рамках решения плоской контактной задачи. Одна из основных задач этого анализа заключается в оценке несущей способности крепи ствола, основанной на расчете нормальных напряжений.

Целью работы было выработать подходы к аналитическому расчету параметров нагружения крепи вертикальных шахтных стволов Старобинского месторождения от действия окружающих выработку пород; выполнить расчет нагрузок, воспринимаемых крепью нескольких стволов рудников Старобинского месторождения с учетом имеющихся данных о физико-механических свойствах окружающих ствол пород; выполнить моделирование послойного нагружения поперечного сечения шахтных стволов на различной глубине.

Аналитический расчет нагрузок на крепь вертикальных шахт. Прежде всего решается классическая задача о НДС упругого кругового кольца [1, с. 29]. Особенность НДС массива горных пород, в котором проведена выработка, заключается в том, что исходный массив имеет установившееся поле начальных напряжений.

Начальные напряжения в массиве в соответствии с [1, с. 33] составляют:

$$\sigma_x^{(0)} = \gamma \cdot H; \quad (2)$$

$$\sigma_y^{(0)} = \lambda \cdot \gamma \cdot H, \quad (3)$$

где γ – удельный вес пород и материала крепи, Н/м³;

H – глубина от земной поверхности, м;

λ – коэффициент бокового давления в массиве пород определяется в соответствии с формулой [5, с. 8]:

$$\lambda = \frac{\mu}{1 - \mu}, \quad (4)$$

где μ – коэффициент Пуассона.

Поле напряжений в массиве вокруг выработки круглого сечения может быть описано выражениями [1, с. 35]:

$$\sigma_r = \gamma \cdot H \cdot \left[\frac{1 + \lambda}{2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right) + \frac{1 - \lambda}{2} \left(1 + 3 \frac{r_0^4}{r^4} - 4 \frac{r_0^2}{r^2} \right) \cos(2\theta) \right]; \quad (6)$$

$$\sigma_\theta = \gamma \cdot H \cdot \left[\frac{1 + \lambda}{2} \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right) - \frac{1 - \lambda}{2} \left(1 + 3 \frac{r_0^4}{r^4} \right) \cos(2\theta) \right]; \quad (7)$$

$$\tau_{r\theta} = -\gamma \cdot H \cdot \frac{1 - \lambda}{2} \left(1 - 3 \frac{r_0^4}{r^4} + \frac{r_0^2}{r^2} \right) \sin(2\theta), \quad (8)$$

где σ_r – нормальные радиальные напряжения, Па;

σ_θ – нормальные тангенциальные напряжения, Па;

$\tau_{r\theta}$ – касательные напряжения, Па;

r, r_0 – расчетный и внутренний радиусы крепи выработки круглого сечения, м;

θ – угол в полярной системе координат, рад.

В вертикальных выработках максимальные вертикальные напряжения на стенке определяются по формуле [5, с. 13]:

$$\sigma_{\max} = K_3 \cdot \gamma \cdot H, \quad (9)$$

где K_3 – коэффициент концентрации сжимающих напряжений на контуре ствола, $K_3 = 3$ на протяженном участке ствола; $K_3 = 6$ на сопряжении с околоствольным двором.

Минимальные сжимающие напряжения в горизонтальной плоскости для выработок круглой формы поперечного сечения рассчитываются по формуле [5, с. 13]:

$$\sigma_{\min} = K_4 \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot H, \quad (10)$$

где K_4 – коэффициент концентрации напряжений ($K_4 = 2$).

При пересечении вертикальной выработки различных по своим физико-механическим свойствам пород (рисунок 1) боковое давление на шахтный ствол определяется по формуле [5, с. 33]:

$$q_n = \gamma_{\text{ср}} \cdot H \cdot \operatorname{tg}^2 \left(\frac{90^\circ - \varphi_{\text{ср}}}{2} \right), \quad (11)$$

где $\gamma_{\text{ср}}$ – средневзвешенное значение объемного веса пород, Н/м³, рассчитывается по формуле:

$$\gamma_{\text{ср}} = \frac{h_1 \gamma_1 + h_2 \gamma_2 + \dots + h_{n-1} \gamma_{n-1} + h_n \gamma_n}{h_1 + h_2 + \dots + h_{n-1} + h_n}; \quad (12)$$

$\varphi_{\text{ср}}$ – средневзвешенное значение угла внутреннего трения, градус, определяется по формуле:

$$\varphi_{\text{ср}} = \frac{h_1 \varphi_1 + h_2 \varphi_2 + \dots + h_{n-1} \varphi_{n-1} + h_n \varphi_n}{h_1 + h_2 + \dots + h_{n-1} + h_n}. \quad (13)$$

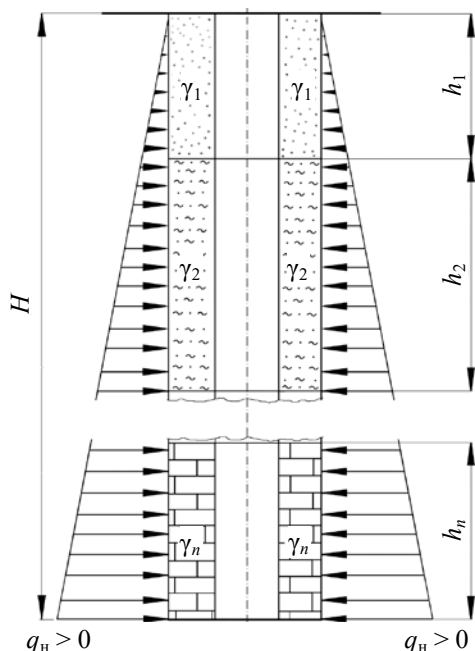


Рисунок 1. – Расчетная схема к формуле (11)

Результаты расчетов для шахт Старобинского месторождения. Вскрытие калийных горизонтов Старобинского месторождения проводилась в сложных гидрогеологических условиях. Максимальная глубина некоторых шахтных стволов превышала 800 м. Забоями стволов пересекались сильно обводненные отложения неогенового и палеогенового периодов, что обусловило применение специального способа проведения выработок с предварительным замораживанием горных пород вокруг стволов на глубину до 200 м и более. На участках водоносных горизонтов (до глубины 300-400 м) стволы Солигорских рудников были закреплены чугунной тюбинговой крепью с заполнением затюбингового пространства бетоном толщиной 0,4-0,7 м. Такая конструкция крепи, вместе с возведением в водоупорных породах специальных кювеляжных опорных венцов, была применена в целях герметизации крепи от проникновения воды и рассолов в ствол, а также разобщения водоносных горизонтов и соленосной толщи.

В качестве объектов аналитического расчета параметров нагружения крепи вертикальных шахтных стволов Старобинского месторождения от действия окружающих выработку пород были выбраны три шахтных ствола, расположенных на шахтных полях разных рудников, удаленных друг от друга на многие километры: ствол № 2 рудника 1 РУ глубиной 503 м, ствол № 1 рудника 3 РУ глубиной 623,8 м и ствол № 1 рудника 4 РУ глубиной 834,7 м. Обобщенный геологический состав горных пород, окружающих

указанные шахтные стволы, приведен на рисунке 2. Непосредственно в расчетах геологические параметры пересекаемых стволами слоев горных пород (высота и физико-механические свойства каждого слоя) для каждого ствола были взяты из материалов ранее выполненных исследований [6].

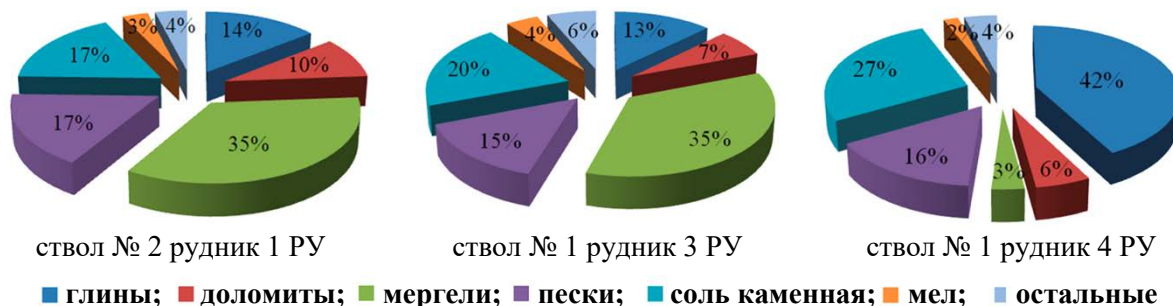


Рисунок 2. – Геологический состав горных пород на рудниках Старобинского месторождения

Аналитические расчеты параметров нагружения крепи вертикальных шахтных стволов выполнялись по формулам (11), (12), (13), их результаты представлены на рисунках 3-5.

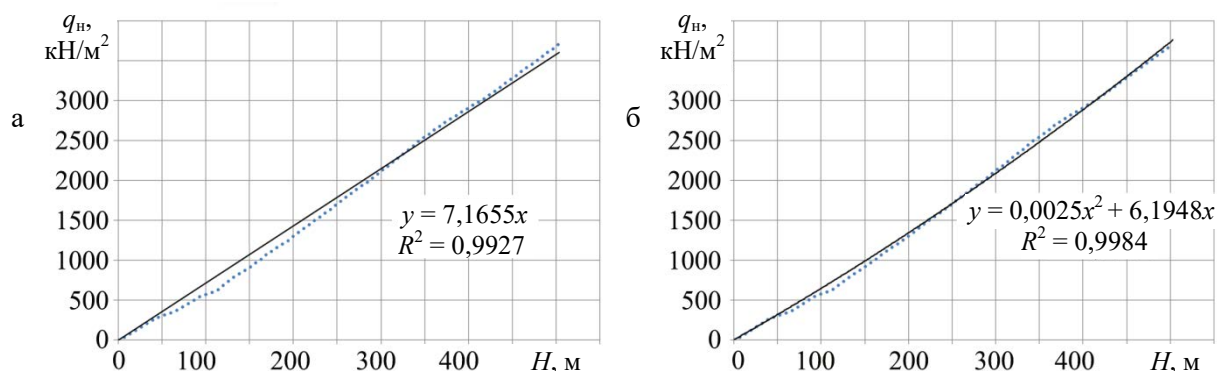


Рисунок 3. – Зависимость давления на ствол № 2 рудника 1 РУ от глубины от земной поверхности с линейным (а) и квадратичным (б) уравнениями регрессии (R – величина достоверности аппроксимации)

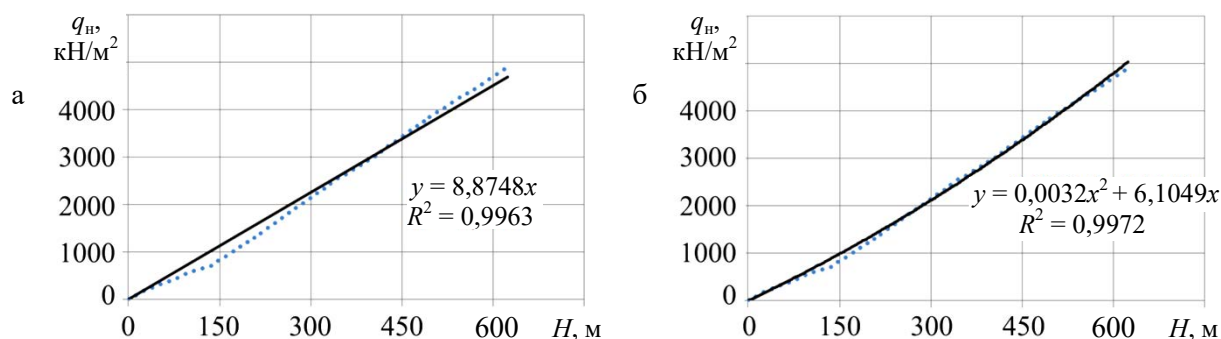


Рисунок 4. – Зависимость давления на ствол № 1 рудника 3 РУ от глубины от земной поверхности с линейным (а) и квадратичным (б) уравнениями регрессии

При этом, согласно расчетам давления по длине ствола, максимальное значение бокового давления на шахтный ствол № 2 рудника 1 РУ в его нижней части равно

$q_{\text{н}}^{\text{1PYCT2}} = 3,707 \text{ МН/м}^2$ ($\gamma_{\text{ср}} = 18,919 \text{ кН/м}^3$; $\varphi_{\text{ср}} = 26,062^\circ$); максимальное значение бокового давления на шахтный ствол № 1 рудника 3 РУ в самой нижней точке ствола составляет $q_{\text{н}}^{\text{3PYCT1}} = 4,909 \text{ МН/м}^2$ ($\gamma_{\text{ср}} = 20,727 \text{ кН/м}^3$; $\varphi_{\text{ср}} = 26,726^\circ$); максимальное значение бокового давления на шахтный ствол № 1 рудника 4 РУ в самой нижней точке ствола составляет $q_{\text{н}}^{\text{4PYCT1}} = 5,640 \text{ МН/м}^2$ ($\gamma_{\text{ср}} = 17,965 \text{ кН/м}^3$; $\varphi_{\text{ср}} = 26,966^\circ$).

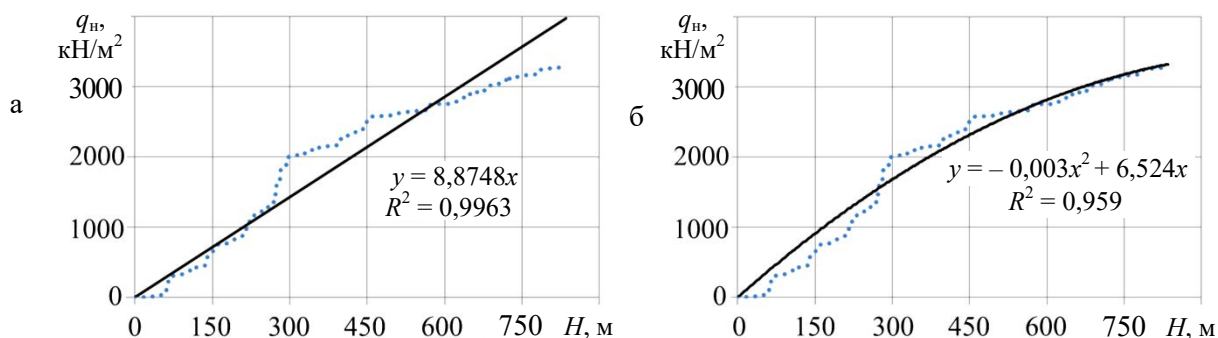


Рисунок 5. – Зависимость давления на ствол № 1 рудника 4 РУ от глубины от земной поверхности с линейным (а) и квадратичным (б) уравнениями регрессии

Анализ зависимостей, представленных на рисунках 3-5, показывает, что для двух стволов (№ 2 рудника 1 РУ и № 1 рудника 3 РУ) боковое давление, действующее на наружную поверхность крепи, рассчитанное послойно с учетом пересечения различных по своим физико-механическим свойствам пород, практически линейно зависит от глубины, при этом величина достоверности аппроксимации R^2 при использовании квадратичного уравнения регрессии для описания зависимости давления на ствол от глубины выработки незначительно (менее 1 %) выше по сравнению с линейным уравнением. На графиках зависимости давления на ствол № 1 рудника 4 РУ демонстрируется больший разброс значений в представленном множестве, при этом квадратичное уравнение регрессии оказалось менее точным по сравнению с линейным (более чем на 3 %), при меньших максимальных амплитудах отклонений расчетных значений. Таким образом, с достаточной точностью можно использовать линейную зависимость при определении давления на ствол шахты на каждой конкретной глубине от поверхности земли.

При известной величине наружного давления на ствол напряжения в i -том поперечном сечении ствола (рисунок 1) можно рассчитать по формулам Ламе для толстостенного цилиндра, приведенным, например, в [7, 8]. С использованием рассчитанных аналитическим способом параметров нагружения крепи выполнено двумерное моделирование нагружения поперечного сечения стволов шахт на различной глубине. Некоторые результаты моделирования представлены в таблицах 1-3. В результате исследования установлено, что полученные значения напряжения в бетонной, чугунной и кирпичной частях не превышают допустимых значений.

Выводы. Рассмотрены подходы к аналитическому расчету параметров нагружения крепи вертикальных стволов шахт от действия окружающих выработку пород. С использованием математических соотношений, описывающих напряженно-деформированное состояние массива вокруг ствола, изложенных в работах Н.С. Булычева и С.С. Кологривко, рассчитаны нагрузки, воспринимаемые крепью нескольких стволов рудников Старобинского месторождения. Показано, что боковое давление, действующее на наружную поверхность крепи, рассчитанное послойно с учетом пересечения различных по своим физико-механическим свойствам пород, практически линейно зависит от глубины.

Таблица 1. – Результаты расчета НДС ствола № 2 рудника 1 РУ в некоторых сечениях

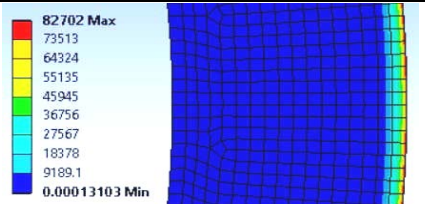
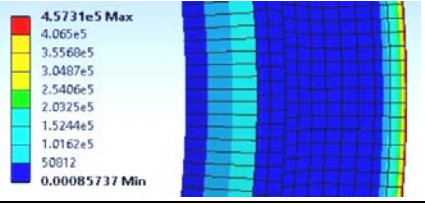
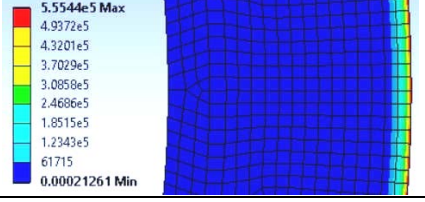
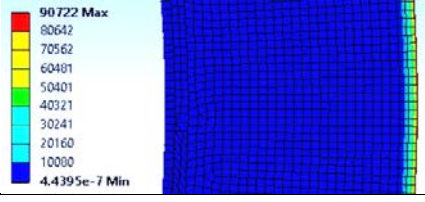
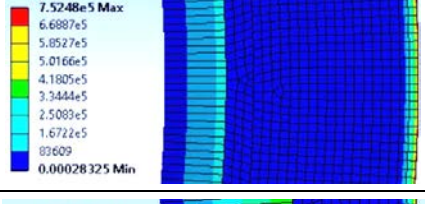
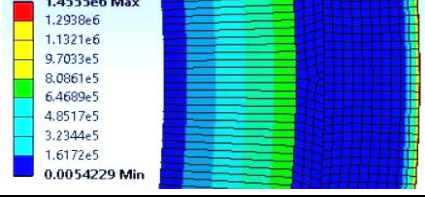
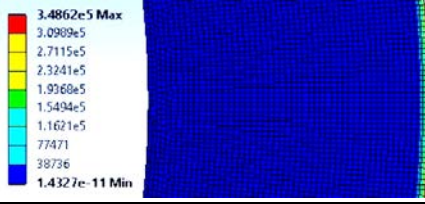
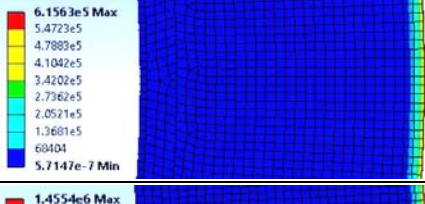
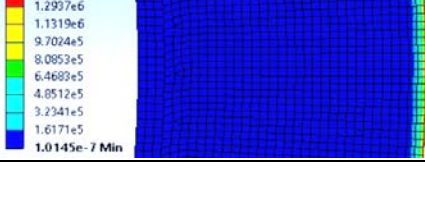
$H, \text{ м}$	Толщина крепи, м			$q_n, \text{ МПа}$	Эквивалентные напряжения по Мизесу, Па
	тюбинг	бетон	кирпич		
74,98	0,04	0,62	-	0,552	
413,98	0,07	0,30	-	3,051	
502,98	0,05	0,56	0,25	3,707	

Таблица 2. – Результаты расчета НДС ствола № 1 рудника 3 РУ в некоторых сечениях

$H, \text{ м}$	Толщина крепи, м		$q_n, \text{ МПа}$	Эквивалентные напряжения по Мизесу, Па
	тюбинг	бетон		
38,88	0,03	0,52	0,306	
322,52	0,06	0,36	2,538	
623,60	0,06	0,20	4,909	

С использованием данных аналитического расчета произведено двухмерное компьютерное моделирование нагружения крепи, согласно которому полученные значения напряжения в бетонной, чугунной и кирпичной частях не превышают допустимых значений.

Таблица 3. – Результаты расчета НДС ствола № 1 рудника 4 РУ в некоторых сечениях

H , м	Толщина крепи, м		q_n , МПа	Эквивалентные напряжения по Мизесу, Па
	тубинг	бетон		
173,98	0,03	0,95	1,176	
297,48	0,06	0,50	2,017	
834,68	0,06	0,60	5,640	

Список использованных источников

1. Булычев, Н.С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах / Н.С. Булычев. – М.: Недра, 1989. – 272 с.
2. Булычев, Н.С. Механика подземных сооружений: учеб. для вузов / Н.С. Булычев. – М.: Недра, 1994. – 382 с.
3. Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи / ВНИМИ, ВНИИОМШС Минуглепрома СССР. – М.: Стройиздат, 1983. – 272 с.
4. Пашкова, О.В. Обоснование технических и технологических решений по сооружению приствольных выработок в пройденных вертикальных стволах: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.22 / О.В. Пашкова. – Новочеркасск, 2015. – 145 л.
5. Кологривко, А.А. Проведение и крепление подземных горных выработок / А.А. Кологривко. – Минск: БГПА, 2001. – 38 с.
6. Выполнить анализ результатов проведенных обследований крепи стволов, оценить необходимость и объемы геофизических работ на деформированных участках: отчет о НИР (промежуточ. по дог. № 899.С.2009, этап 1.4) / ОАО «Белгорхимпром»; рук. А.М. Ефимов; исполн. Т.П. Кафанова [и др.]. – Минск, 2009. – 42 с. – № ГР 20092386.
7. Кучерявый, В.И. Уравнения математической физики для решения задач теории упругости: учеб. пособие / В.И. Кучерявый, С.Н. Мильков. – Ухта: УГТУ, 2011. – 120 с.
8. Казаринов, Ю.И. Прочность элементов конструкций с вырезами и повреждениями: монография / Ю.И. Казаринов. – Тюмень: ТИУ, 2017. – 188 с.

Информация об авторе

Денис Александрович Диулин – Генеральный директор, ОАО «Трест Шахтоспецстрой» (223710, Солигорск-4, Беларусь), e-mail: trest@shahta.by.

Information about the author

Denis Aleksandrovich Diulin – General Director, JSC “Trest Shahtospetsstroy” (223710, Soligorsk-4, Belarus), e-mail: trest@shahta.by.

Поступила в редакцию 11.10.2021 г.

УДК 622.245.5:622.285:622.363.2(476)

А.А. Гарнишевский*Научно-производственное унитарное предприятие «Институт горного дела»,
г. Солигорск, Беларусь***ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ НАПРАВЛЕНИЯ ОЧИСТНОЙ ВЫЕМКИ
И ПЕРЕДВИЖКИ ЗАБОЙНОЙ КРЕПИ НА СТЕПЕНЬ НАГРУЖЕННОСТИ
ПРИЗАБОЙНОГО ПРОСТРАНСТВА НИЖНИХ ЛАВ
ПРИ СЛОЕВОЙ ВЫЕМКЕ ТРЕТЬЕГО КАЛИЙНОГО ПЛАСТА**

Аннотация. В статье приведены результаты исследований проявления горного давления в нижних лавах с труднообрушаемой кровлей при слоевой выемке Третьего калийного пласта Старобинского месторождения при различных схемах направления очистной выемки и передвижки забойной крепи для поддержания призабойного пространства в безопасном состоянии.

Ключевые слова: шахтные исследования, проявления горного давления, призабойное пространство, схема направления очистной выемки и передвижки забойной крепи.

A.A. Harnisheusky*Scientific Production Unitary Enterprise "Institute of Mining", Soligorsk, Belarus***THE INFLUENCE OF VARIOUS SCHEMES OF THE DIRECTION OF THE
CLEANING EXCAVATION AND THE MOVEMENT OF THE DOWNHOLE
SUPPORT TO THE DEGREE OF LOADING BOTTOM-HOLE SPACE
OF THE LOWER LAVAS DURING THE LAYERED EXCAVATION
OF THE THIRD POTASH RESERVOIR**

Abstract. The article presents the results of studies of the manifestation of rock pressure in the lower lavas with a hard-to-break roof during the layered excavation of the Third potash formation of the Starobin deposit with different schemes of the direction of the production excavation and the movement of the bottom-hole support to maintain the bottomhole space in a safe state.

Keywords: mine research, manifestations of rock pressure, bottomhole space, the scheme of the direction of the cleaning excavation and the movement of the downhole support.

Введение. На Старобинском месторождении калийных солей при отработке пластов полезного ископаемого слоевыми лавами применяются различные схемы направления очистной выемки и передвижки забойной крепи. Для оптимизации процесса очистной выемки и предотвращения аварийных ситуаций, связанных с опасными проявлениями горного давления, возникла необходимость оценить влияние различных схем на степень нагруженности призабойного пространства лавы.

В настоящей статье приведены результаты шахтных исследований по изучению взаимодействия механизированных крепей МХП-14/22 и МХП-16/25 с труднообрушаемой кровлей при выемке слоев 2, 2-3, 3 Третьего калийного пласта валовыми лавами № 13-н-2 рудника 3 РУ и № 102 рудника 1 РУ ОАО «Беларуськалий» при трех различных схемах направления очистной выемки и передвижки забойной крепи.

По первой схеме передвижка крепи выполняется последовательно относительно очистной выемки, которая ведется в направлении от конвейерного к вентиляционному штреку (последовательная схема передвижки).

По второй схеме крепь передвигается одновременно с очистной выемкой впереди комбайна на расстоянии 30-35 м. Очистная выемка ведется в направлении от вентиляционного к конвейерному штреку.

По третьей схеме крепь передвигается на расстоянии 20-25 м позади комбайна при челноковой схеме его работы.

Методика проведения шахтных исследований. При проведении шахтных исследований был применен метод получения данных об интенсивности нагружения призабойного пространства в нижних лавах, который заключается в измерении давления на забойную крепь при помощи автоматизированной системы Кодак с датчиками горного давления, расположенными равномерно по всей длине лавы.

Периодически измерялись отход лавы от монтажного штрека, ширина незакрепленной полосы кровли призабойного пространства и величина зависания породной консоли за крепью по всей длине лавы. Производились визуальный осмотр призабойного пространства лавы с фиксированием наличия и величины раскрытия цикловых трещин и изучение характера обрушения непосредственной кровли за крепью визуальным способом.

Изучение трендов автоматизированной системы Кодак и построенных на их основе гистограмм относительных частот распределения продолжительности циклов очистных работ показало, что основную часть составляют циклы с продолжительностью 90-480 мин, поэтому продолжительность циклов была ограничена временем T , равным 480 мин. Для тех циклов, где гидростойки к моменту передвижки секций не выходили на рабочее сопротивление, к достигнутому на этот момент сопротивлению применен термин – максимальное сопротивление, при обработке данных производилось объединение циклов с выходом гидростоек на рабочее и максимальное сопротивление, а показателям присваивался индекс «рм».

При статистической обработке данных измерений в каждой лаве определялись средние и максимальные значения основных показателей проявления горного давления в каждом месте измерений, а также усредненные значения по всей длине лавы.

Основными показателями, по которым оценивалась интенсивность проявления горного давления в лавах, являлись:

- доля циклов с выходом гидростоек на рабочее сопротивление $D_{ц}$;
- рабочее сопротивление гидростоек $P_{раб}$;
- рабочее или максимальное сопротивление гидростоек $P_{рм}$;
- скорость нарастания сопротивления гидростоек забойной крепи в очистных циклах от начального распора до выхода на рабочее или максимальное сопротивление $V_{рм}$;
- фактическая удельная нагрузка на крепь по длине лавы $Q_{ф}$.

Подробно обработка и анализ полученных данных, а также порядок проведения расчетов показателей горного давления в лавах приведены в работе [1].

Нижняя валовая лава № 13-н-2 рудника 3 РУ длиной 247 м с крепью МХП-14/22 сопротивлением 720 кН/м². Исследования проводились на участке выемочного столба между маркшейдерскими отметками 120-544 м с использованием всех трех схем передвижки крепи [2].

Первый участок выемочного столба от отметки 143 м до отметки 416 м был отработан по последовательной схеме передвижки крепи, второй участок от отметки 416 м до отметки 526 м был отработан по схеме передвижки крепи впереди комбайна и третий участок от отметки 526 м до отметки 544 м был отработан по схеме передвижки крепи позади комбайна при челноковой схеме его работы.

Для обеспечения безопасности очистной выемки при отходе лавы от монтажного штрека на 250 м была создана «зона смягчения» со стороны вентиляционного штрека лавы, и выполнялись мероприятия, изложенные в пункте 1.4.1.6 «Инструкции ...» [3].

Измерения и визуальные наблюдения, выполненные с посещением лавы в течение всего периода отработки выемочного столба между маркшейдерскими отметками 143-544 м, показали следующее.

1. Ширина призабойного пространства B_3 при различных схемах передвижки крепи изменялась в небольшом диапазоне и составила в среднем 3,8-4,2 м, не превышая 5,1 м.

2. Длина зависающих породных консолей l_k за крепью достигала наибольших величин при последовательной схеме передвижки и составила максимум 6,0-11,0 м. При передвижке крепи впереди и позади комбайна зависания кровли перед обрушением не превышали 6,0 и 3,0 м соответственно.

3. Призабойное пространство лавы сохранялось в устойчивом состоянии как в периоды между обрушениями, так и в моменты обрушений непосредственной и основной кровли. Случаев выхода из строя гидростоек забойной крепи при обрушениях основной кровли зафиксировано не было.

Исследования с использованием автоматизированной системы Кодак с датчиками горного давления проводились также на участке выемочного столба между маркшейдерскими отметками 143-544 м при средней скорости подвигания лавы 3,0 м/сут.

Датчики горного давления были установлены на одной из гидростоек каждой секции крепи №№ 13, 26, 39, 52, 65, 78, 91, 104, 117, 130. Усредненные результаты исследований представлены в таблице 1.

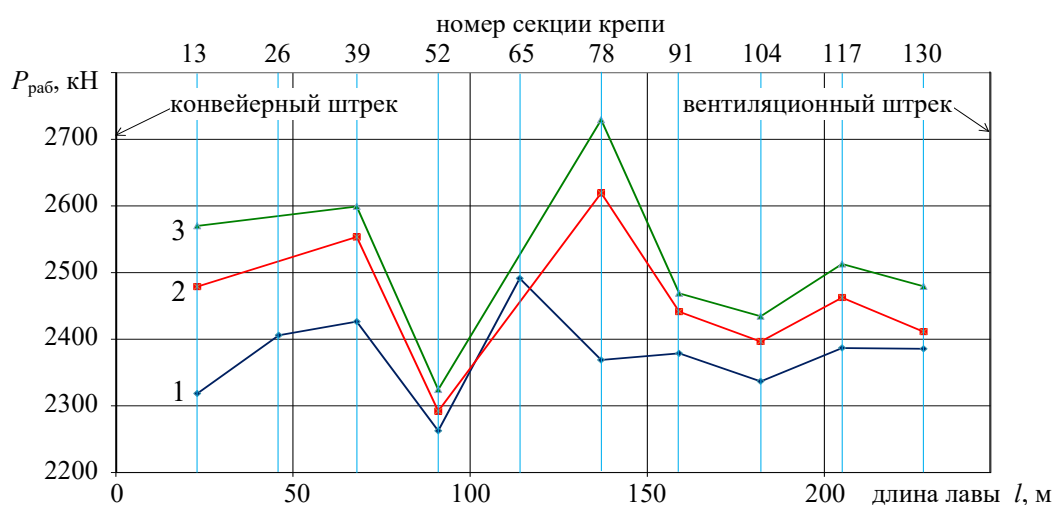
Таблица 1. – Усредненные значения показателей проявления горного давления в лаве № 13-н-2 рудника 3 РУ

Показатели проявления горного давления	Последовательная схема передвижки крепи		Передвижка крепи впереди комбайна		Передвижка крепи позади комбайна	
	Усредненные значения показателей					
	средние	макси-мальные	средние	макси-мальные	средние	макси-мальные
Доля циклов с выходом гидростоек на рабочее сопротивление $D_{ц}$, %	34,9		45,1		38,8	
Диапазон изменения $D_{ц}$, %	4,6-64,6		4,7-68,4		14,3-69,6	
Сопротивление гидростоек при выходе на рабочее сопротивление $P_{раб}$, кН	2376	2471	2457	2537	2515	2526
Диапазон изменения $P_{раб}$, кН	2263-2491	2336-2548	2292-2619	2350-2793	2324-2729	2346-2737
Сопротивление гидростоек при выходе на рабочее или максимальное сопротивление $P_{рм}$, кН	2032	2471	2233	2536	2179	2526
Диапазон изменения $P_{рм}$, кН	1708-2226	2336-2548	1841-2488	2350-2785	1900-2563	2346-2737
Скорость нарастания сопротивления гидростоек от начального распора до выхода на рабочее или максимальное сопротивление $V_{рм}$, кН/мин	4,57	12,92	6,35	14,79	4,96	10,46

Продолжение таблицы 1

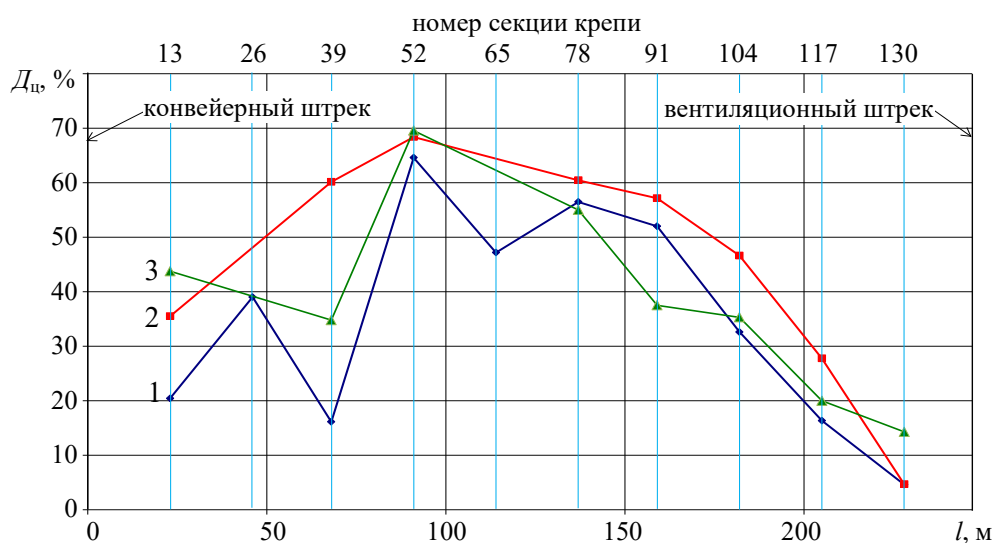
Диапазон изменения $V_{\text{рм}}$, кН/мин	2,59-6,37	9,4-15,0	3,14-8,42	8,33-20,16	2,59-6,50	5,48-15,24
Фактическая удельная нагрузка на крепь $Q_{\text{ф}}$, кН/м ²	593,3	720,4	616,0	700,0	633,0	736,0
Диапазон изменения $Q_{\text{ф}}$, кН/м ²	470,1-661,1	666,0-762,3	509,4-688,4	650,4-772,8	579,1-677,0	646,1-776,4

На рисунках 1 и 2 показаны графики изменения средних значений рабочего сопротивления $P_{\text{раб}}$ и доли циклов $D_{\text{ц}}$ с выходом гидростоек на $P_{\text{раб}}$ по длине лавы.



1 – при последовательной схеме передвижки крепи; 2 – при схеме передвижки крепи впереди комбайна; 3 – при схеме передвижки крепи позади комбайна

Рисунок 1. – Изменение средних значений $P_{\text{раб}}$ по секциям с установленными датчиками горного давления при различных схемах передвижки крепи в лаве № 13-н-2 рудника 3 РУ



1 – при последовательной схеме передвижки крепи; 2 – при схеме передвижки крепи впереди комбайна; 3 – при схеме передвижки крепи позади комбайна

Рисунок 2. – Изменение $D_{\text{ц}}$ по секциям с установленными датчиками горного давления при различных схемах передвижки крепи в лаве № 13-н-2 рудника 3 РУ

Анализ данных и графического материала свидетельствует о том, что сопротивление гидростоек $P_{\text{раб}}$ при срабатывании предохранительных клапанов у различных секций крепи вдоль лавы отличается друг от друга и от рабочего (2548 кН), указанного в технической характеристике крепи. Так, диапазон изменения средних значений $P_{\text{раб}}$ у секций с установленными датчиками горного давления составил:

- при последовательной схеме передвижки крепи 2263-2491 кН;
- при передвижке крепи впереди комбайна 2292-2619 кН;
- при передвижке крепи позади комбайна 2324-2729 кН.

При различных схемах передвижки крепи характер распределения показателей $P_{\text{раб}}$ и D_c вдоль лавы остается практически неизменным. Максимальные значения обоих показателей получены в центральной части лавы, а минимальные – в концевой части со стороны вентиляционного штрека (низкие значения $P_{\text{раб}}$ на секции № 52 обусловлены разрегулировкой предохранительного клапана).

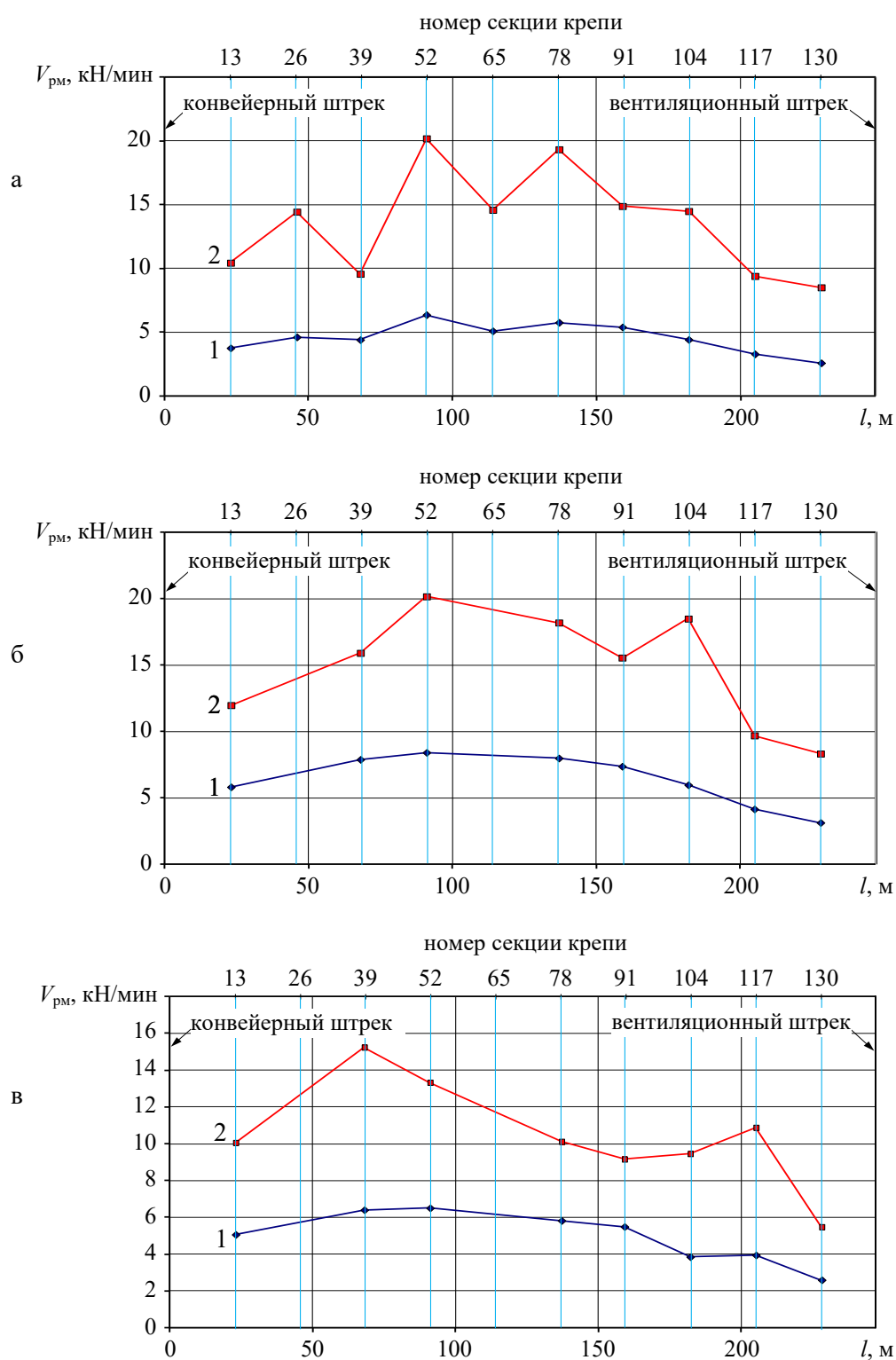
Данные по средним величинам сопротивления крепи $P_{\text{рм}}$ показывают, что максимальные значения этого показателя во всех схемах передвижки достигаются в центральной части лавы (2491-2619 кН). В концевых частях наблюдается снижение $P_{\text{рм}}$, которое наиболее существенно при последовательной схеме передвижки – до 1708 кН со стороны вентиляционного штрека и до 1884 кН со стороны конвейерного штрека. При схемах передвижки крепи впереди и позади комбайна снижение $P_{\text{рм}}$ было менее существенным – в среднем до 1841-1900 кН в концевой части со стороны вентиляционного штрека и до 2251-2262 кН в концевой части со стороны конвейерного штрека. Максимальные значения $P_{\text{рм}}$ во всех схемах передвижки крепи распределялись вдоль лавы более равномерно и, в основном, достигали рабочего сопротивления.

На рисунке 3 приведены графики изменения скорости $V_{\text{рм}}$ по длине лавы во всех схемах передвижки крепи. Из рисунка видно, что наибольшие значения как средней $V_{\text{рм.ср}}$, так и максимальной $V_{\text{рм.мах}}$ были зафиксированы в центральной части лавы (секции № 52 и № 78). Для первой, второй и третьей схем передвижки крепи величина $V_{\text{рм.ср}}$ составила 6,37 и 5,77 кН/мин; 8,42 и 7,99 кН/мин; 6,50 и 5,82 кН/мин соответственно. Максимальные значения $V_{\text{рм.мах}}$ на этих же секциях были значительно больше – 20,18 и 19,33 кН/мин (первая схема), 20,16 и 18,19 кН/мин (вторая схема), 13,33 и 10,12 кН/мин (третья схема), причем в третьей схеме $V_{\text{рм.мах}}$ сместилась немного в сторону конвейерного штрека (секция № 39) и составила 15,24 кН/мин. В концевых частях лавы средние значения $V_{\text{рм}}$ снижались примерно в 2,4-2,5 раза, а максимальные – в 1,4-2,8 раза относительно центральной части.

В циклах очистных работ с обрушениями основной кровли уровень максимальных значений $V_{\text{рм.обр}}$ составил 20,18 кН/мин при последовательной схеме передвижки крепи, 20,16 кН/мин при передвижке крепи впереди комбайна. Полученные данные свидетельствуют о высокой интенсивности обрушений и степени нагруженности призабойного пространства лавы.

Распределение основного показателя горного давления в лаве – фактической удельной нагрузки на крепь – средних $Q_{\text{ф.ср}}$ и максимальных $Q_{\text{ф.мах}}$ значений по длине лавы показано на рисунке 4.

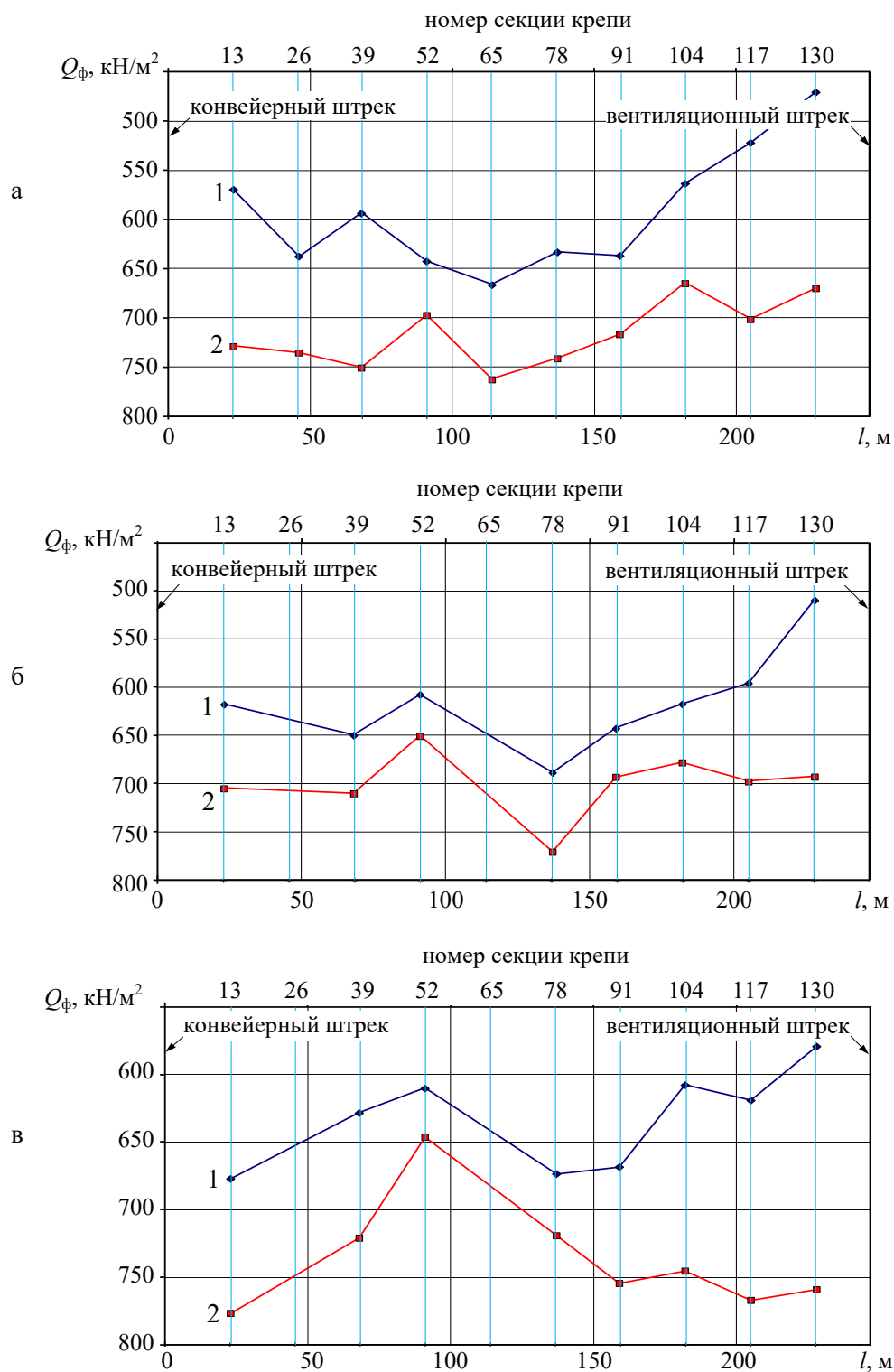
Анализ данных и графического материала свидетельствует о том, что характер распределения средних и максимальных значений $Q_{\text{ф}}$ по длине лавы во всех схемах передвижки крепи почти не отличается друг от друга. Максимальные значения $Q_{\text{ф.ср}}$ и $Q_{\text{ф.мах}}$ зафиксированы в центральной части лавы (секции №№ 52, 65, 78 и 91), и лишь при схеме передвижки крепи позади комбайна $Q_{\text{ф.мах}}$ перемещаются к концевым частям, достигая уровня 759,0 и 776,4 кН/м², сопоставимого с центральными частями двух первых схем.



а – последовательная схема передвижки крепи; **б** – схема передвижки крепи впереди комбайна; **в** – позади комбайна

1 – средние значения $V_{рм.ср}$; **2** – максимальные значения $V_{рм.мах}$

Рисунок 3. – Изменение скорости нарастания сопротивления гидростоек от начального распора до выхода на рабочее или максимальное сопротивление $V_{рм}$ по длине лавы при различных схемах передвижки крепи в лаве № 13-н-2 рудника 3 РУ



а – последовательная схема передвижки крепи; б – схема передвижки крепи
впереди комбайна; в – позади комбайна

1 – средние значения $Q_{ф.ср}$; 2 – максимальные значения $Q_{ф.мах}$

Рисунок 4. – Изменение фактической удельной нагрузки на крепь $Q_{ф}$ по длине лавы при различных схемах передвижки крепи в лаве № 13-н-2 рудника 3 РУ

Нижняя валовая лава № 102 рудника 1 РУ длиной 216 м с крепью МХП-16/25 сопротивлением 700 кН/м². Исследования проводились на участке выемочного столба между маркшейдерскими отметками 21-583 м с использованием двух первых схем передвижки крепи, то есть последовательной схемы и схемы передвижки впереди комбайна [4].

Отработка выемочного столба по первой схеме передвижки велась от маркшейдерской отметки 21 м до отметки 535 м, а по второй схеме передвижки – от маркшейдерской отметки 535 м до отметки 583 м при средней скорости подвигания лавы 2,8 м/сут.

Измерения и визуальные наблюдения, выполненные при посещении лавы научными сотрудниками в период отработки выемочного столба между отметками 21-535 м, показали следующее.

1. Ширина призабойного пространства с учетом обеих схем передвижки крепи составляла в среднем 3,5-4,2 м и не превышала 4,9 м.

2. Длина зависающих консолей l_k за крепью при последовательной схеме ее передвижки составляла в среднем 1,4-3,5 м, а максимальная – в центральной части лавы достигала 11-ти метров и постепенно уменьшалась до 6-7 м у конвейерного и вентиляционного штреков. При передвижке крепи впереди комбайна зависания непосредственной кровли могли вообще отсутствовать почти по всей длине лавы, а в отдельных циклах очистных работ они достигали 7-ми метровой длины в центральной части лавы. Средние значения l_k почти не отличались от последовательной схемы передвижки и равнялись 1,5-4,8 м.

3. Периодически происходящие в лаве обрушения основной кровли различной интенсивности не ухудшали состояния призабойного пространства и не приводили к выходу из строя забойной крепи.

Исследования с использованием автоматизированной системы Кодак проводились по датчикам горного давления, установленным на одной из гидростоек каждой секции крепи №№ 10, 22, 34, 46, 58, 70, 82, 94, 106 и 114. Усредненные результаты исследований представлены в таблице 2.

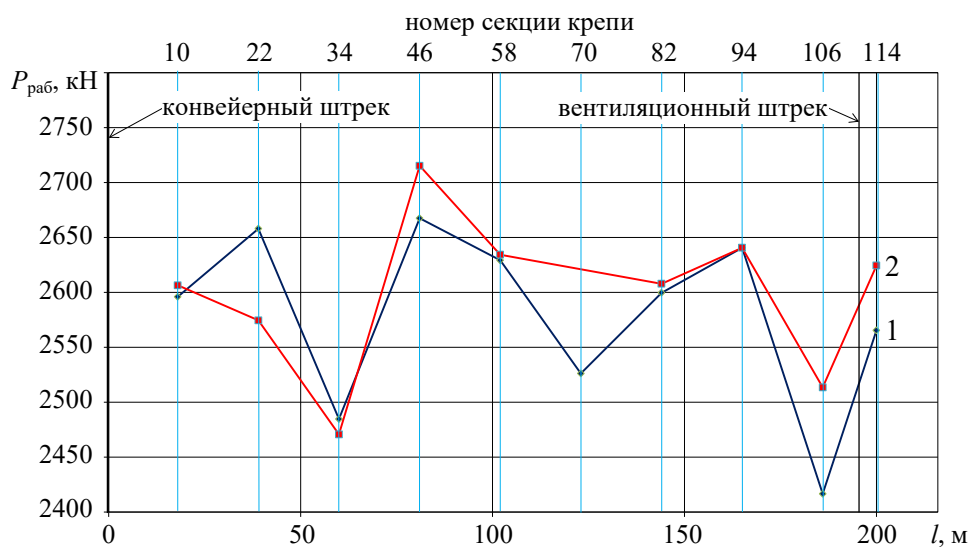
Таблица 2. – Усредненные значения показателей проявления горного давления в валовой лаве № 102 рудника 1 РУ

Показатели проявления горного давления	Последовательная схема передвижки крепи		Передвижка крепи впереди комбайна	
	Усредненные значения показателей			
	средние	макси- мальные	средние	макси- мальные
Доля циклов с выходом гидростоек на рабочее сопротивление $D_{ц}$, %	42,5		42,6	
Диапазон изменения $D_{ц}$, %	7,1-71,5		9,5-75,0	
Сопротивление гидростоек при выходе на рабочее сопротивление $P_{раб}$, кН	2578	2638	2599	2615
Диапазон изменения $P_{раб}$, кН	2417-2667	2516-2771	2471-2715	2484-2728
Сопротивление гидростоек при выходе на рабочее или максимальное сопротивление $P_{рм}$, кН	2317	2638	2334	2615
Диапазон изменения $P_{рм}$, кН	1977-2550	2516-2771	2019-2674	2484-2728
Скорость нарастания сопротивления гидростоек от начального распора до выхода на рабочее или максимальное сопротивление $V_{рм}$, кН/мин	4,43	11,27	5,01	9,54

Продолжение таблицы 2

Диапазон изменения $V_{\text{рм}}$, кН/мин	2,67-6,04	5,48-17,44	2,34-7,29	3,56-15,09
Фактическая удельная нагрузка на крепь $Q_{\text{ф}}$, кН/м ²	709,6	809,1	690,9	773,3
Диапазон изменения $Q_{\text{ф}}$, кН/м ²	622,5-760,9	723,2-869,6	599,2-826,0	746,9-842,8

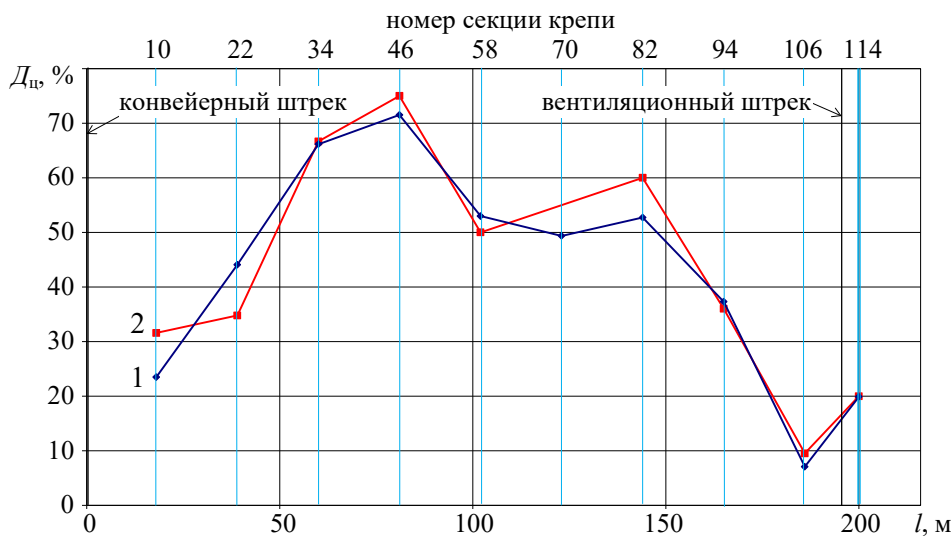
На рисунках 5 и 6 показаны графики изменения средних значений рабочего сопротивления гидростоек $P_{\text{раб}}$ и доли циклов $D_{\text{ц}}$ со срабатыванием предохранительных клапанов по длине лавы.



1 – при последовательной схеме передвижки крепи;

2 – при схеме передвижки крепи впереди комбайна

Рисунок 5. – Изменение средних значений $P_{\text{раб}}$ по секциям с установленными датчиками горного давления при различных схемах передвижки крепи в лаве № 102 рудника 1 РУ



1 – при последовательной схеме передвижки крепи;

2 – при схеме передвижки крепи впереди комбайна

Рисунок 6. – Изменение $D_{\text{ц}}$ по секциям с установленными датчиками горного давления при различных схемах передвижки крепи в лаве № 102 рудника 1 РУ

Анализ табличных данных и графического материала свидетельствует о том, что сопротивление гидростоек $P_{\text{раб}}$ при срабатывании предохранительных клапанов у различных секций крепи вдоль лавы отличается друг от друга и от рабочего (2548 кН), указанного в технической характеристике крепи. Так, средние значения $P_{\text{раб}}$ у гидростоек секций № 10 ... № 114 с установленными датчиками горного давления составляют 2417-2715 кН, а у отдельно взятой секции № 46 максимальное значение $P_{\text{раб}}$ достигает 2771 кН. У одних и тех же секций крепи отмечается изменение рабочего сопротивления гидростоек с установленными датчиками горного давления в процессе отработки выемочного столба. Установленные исследованиями различные уровни рабочего сопротивления гидростоек связаны, на наш взгляд, с разрегулировкой предохранительных клапанов в процессе эксплуатации крепи.

В обеих схемах передвижки крепи доля циклов очистных работ $D_{\text{ц}}$, в которых гидростойки крепи выходили на рабочее сопротивление, существенно изменяется на различных участках по длине лавы. В то же время, как видно из рисунка 6, характер этого изменения и числовые значения в обеих схемах передвижки отличаются незначительно.

Наименьшие значения показателя $D_{\text{ц}}$ получены у вентиляционного штрека (7,1; 9,5 % на секции № 106). В тупиковой части (секция № 114) и у конвейерного штрека (секция № 10) доля выхода гидростоек на рабочее сопротивление возрастает до 19,9; 20,0 % и 23,5; 31,6 % соответственно, а в центральной части лавы до 52,7; 60,0 % (секция № 82) и до 71,5; 75,0 % (секция № 46).

Анализ данных показывает, что характер распределения сопротивления гидростоек $P_{\text{рм}}$ по длине лавы почти не отличается в обеих схемах передвижки крепи. По величине наибольшие средние значения (2290-2674 кН) достигаются в центральной части лавы. Далее идет снижение показателей до 2224-2262 кН в сторону конвейерного штрека и еще большее снижение до 1977-2019 кН в сторону вентиляционного штрека лавы. В тупиковой части лавы значения сопротивления увеличиваются до 2135-2153 кН.

На рисунке 7 приведены графики изменения скорости нарастания сопротивления гидростоек $V_{\text{рм}}$ по длине лавы в обеих схемах передвижки крепи.

Из рисунка видно, что наибольшие значения как средней, так и максимальной скорости $V_{\text{рм}}$ были зафиксированы в центральной части лавы (секции № 34 и № 46). При последовательной схеме передвижки они составляли 5,72; 6,01 кН/мин (средние) и 17,44; 16,51 кН/мин (максимальные), а при схеме передвижки крепи впереди комбайна 6,51; 7,29 кН/мин (средние) и 15,09; 14,42 кН/мин (максимальные). При этом разница в показателе $V_{\text{рм}}$ составила всего 12-18 %. Со стороны конвейерного и вентиляционного штреков средние значения $V_{\text{рм}}$ снижались примерно в 1,5-2,0 раза, а максимальные – в 2,3-4,2 раза.

В циклах очистных работ с обрушениями основной кровли уровень максимальных значений $V_{\text{рм.обр}}$ составил 13,27-17,44 кН/мин при последовательной схеме передвижки крепи и 12,91-15,09 кН/мин – при передвижке крепи впереди комбайна. Полученные данные свидетельствуют о высокой интенсивности обрушений и степени нагруженности призабойного пространства лавы.

Распределение фактической удельной нагрузки на крепь $Q_{\text{ф}}$ – средних $Q_{\text{ф.ср}}$ и максимальных $Q_{\text{ф.мах}}$ значений по длине лавы показано на рисунке 8.

Анализ данных и графического материала свидетельствует о том, что распределение значений $Q_{\text{ф.ср}}$ и $Q_{\text{ф.мах}}$ по длине лавы в обеих схемах передвижки крепи носит схожий характер. Максимальные значения обоих показателей ($Q_{\text{ф.ср}} = 740,5-826,0 \text{ кН/м}^2$; $Q_{\text{ф.мах}} = 774,7-842,8 \text{ кН/м}^2$) получены в центральной части лавы (секции № 46 и № 58), а минимальные ($Q_{\text{ф.ср}} = 622,5; 638,8 \text{ кН/м}^2$; $Q_{\text{ф.мах}} = 723,2; 753,0 \text{ кН/м}^2$) – у конвейерного

штрека (секция № 10). У вентиляционного штрека (секция № 106) значения $Q_{ф.ср}$ составляют 599,2; 642,2 кН/м^2 , то есть почти не отличаются от этого значения у конвейерного штрека. В то же время, при последовательной схеме передвижки крепи значения $Q_{ф.мах}$ в районе вентиляционного штрека в отдельных циклах очистных работ достигали 825,8 кН/м^2 (секция № 106); 867,6 кН/м^2 (секция № 94) и 869,6 кН/м^2 (секция № 114 в тупиковой части лавы).

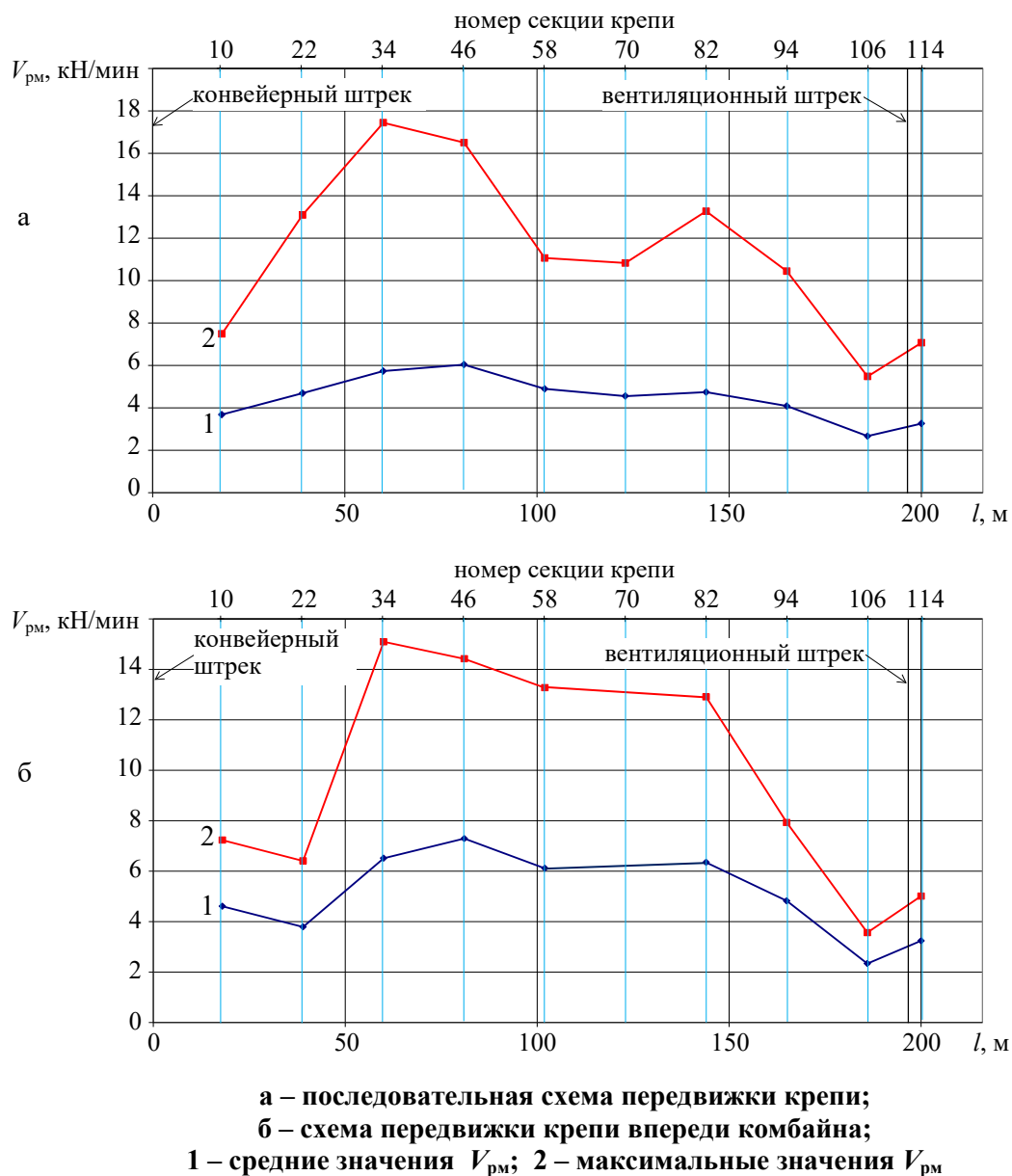
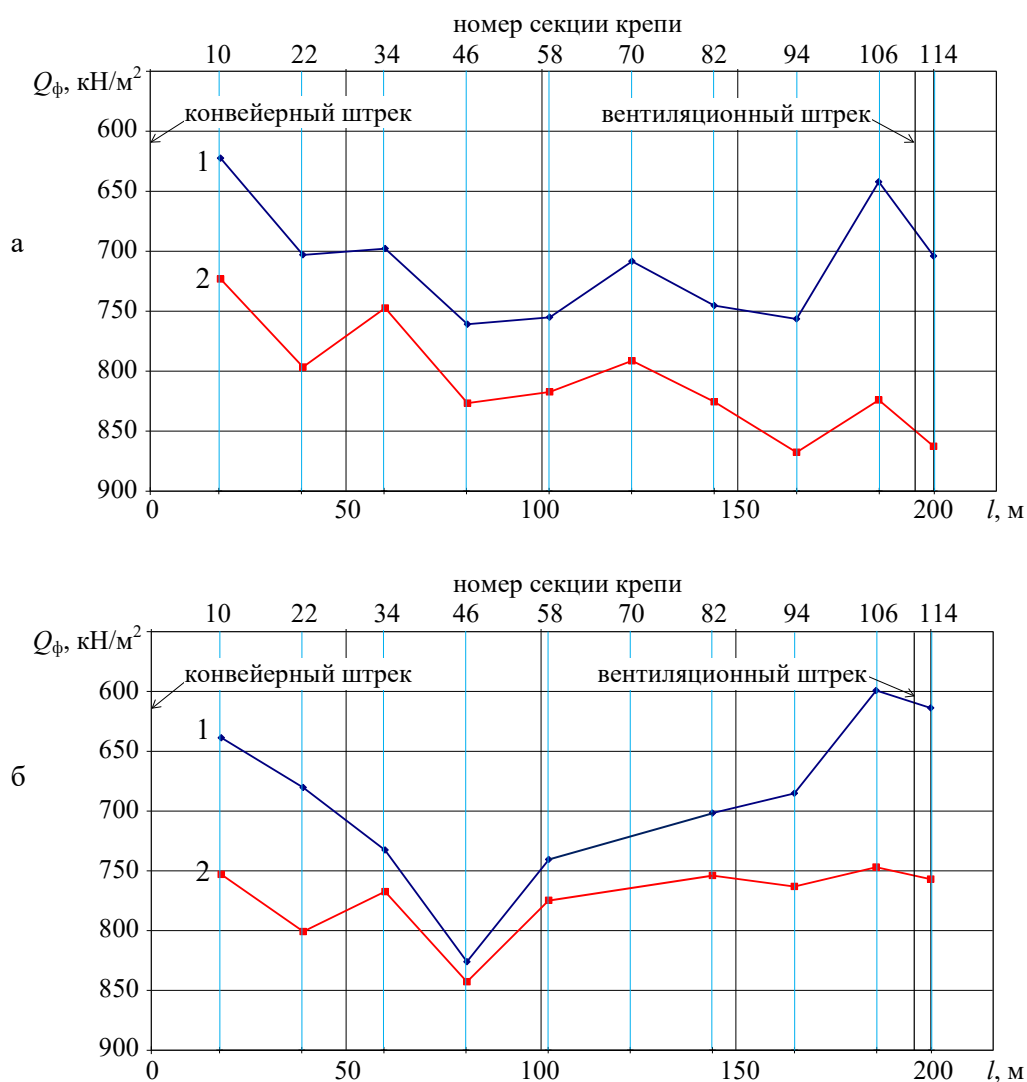


Рисунок 7. – Изменение скорости нарастания сопротивления гидростоек от начального распора до выхода на рабочее или максимальное сопротивление $V_{рм}$ по длине лавы при различных схемах передвижки крепи в лаве № 102 рудника 1 РУ

Заключение. В результате выполненных шахтных исследований были получены данные о нагруженности призабойного пространства в лавах № 102 рудника 1 РУ и № 13-н-2 рудника 3 РУ ОАО «Беларуськалий» при различных схемах направления очистной выемки и передвижки забойной крепи [5].



а – последовательная схема передвижки крепи;

б – схема передвижки крепи впереди комбайна;

1 – средние значения Q_ϕ ; **2** – максимальные значения Q_ϕ

Рисунок 8. – Изменение фактической удельной нагрузки на крепь Q_ϕ по длине лавы при различных схемах передвижки крепи в лаве № 102 рудника 1 РУ

Установлено, что ни одна из рассмотренных схем направления очистной выемки и передвижки забойной крепи (последовательная, впереди и позади комбайна) не оказывает существенного влияния на степень нагруженности очистных забоев, так как полученные в лавах № 13-н-2 и № 102 усредненные значения основных показателей с использованием этих схем отличаются не более, чем на 20 %. В то же время, более благоприятные условия для работы персонала лавы создаются при направлении очистной выемки от вентиляционного штрека к конвейерному, с передвижкой забойной крепи впереди комбайна, за счет нахождения людей на свежей, не запыленной струе воздуха.

Список использованных источников

1. Разработать методику проведения шахтных исследований в нижних слоевых лавах Третьего калийного пласта с использованием крепей высокого сопротивления: отчет о НИР (промежуточ. по дог. № 12/13, этап 3) / ЧУП «Институт горного дела»: рук. Б.И. Петровский; исполн. А.А. Гарнишевский [и др.]. – Солигорск, 2013. – 43 с. – № ГР 20131606.

2. Изучить закономерности проявления горного давления в нижних лавах с крепью повышенной несущей способности при слоевой бесцеликовой выемке Третьего калийного пласта в различных горно-геологических условиях в лаве № 13-н-2 рудника 3 РУ длиной 247 м с крепью МХП-14/22 сопротивлением 680 кН/м^2 при различных схемах передвижки крепи: отчет о НИР (промежуточ. по дог. № 12/13, этап 4.2) / Унитарное предприятие «Институт горного дела»; рук. Б.И. Петровский; исполн. А.А. Гарнишевский [и др.]. – Солигорск, 2014. – 97 с. – № ГР 20131606.

3. Инструкция по применению систем разработки на Старобинском месторождении. – Солигорск-Минск, 2018 г. – 146 с.

4. Изучить закономерности проявления горного давления в нижних лавах с крепью повышенной несущей способности при слоевой бесцеликовой выемке Третьего калийного пласта в различных горно-геологических условиях в лаве № 102 1 РУ длиной 216 м с крепью К.8 сопротивлением 680 кН/м^2 при различных схемах передвижки крепи: отчет о НИР (промежуточ. по дог. № 12/13, этап 4.3) / Унитарное предприятие «Институт горного дела»; рук. Б.И. Петровский; исполн. А.А. Гарнишевский [и др.]. – Солигорск, 2015. – 103 с. – № ГР 20131606.

5. Обобщить результаты исследований и выдать заключительный отчет о НИР с рекомендациями по требуемой несущей способности крепи для поддержания в безопасном состоянии призабойного пространства нижних лав с труднообрушаемой кровлей при слоевой бесцеликовой выемке Третьего пласта: отчет о НИР (заключит. по дог. № 12/13, этап 6) / Унитарное предприятие «Институт горного дела»; рук. Б.И. Петровский; исполн. А.А. Гарнишевский [и др.]. – Солигорск, 2015. – 123 с. – № ГР 20131606.

Информация об авторе

Александр Александрович Гарнишевский – научный сотрудник Научно-производственного унитарного предприятия «Институт горного дела» (ул. Козлова, 69, 223710, г. Солигорск, Беларусь), e-mail: sigd@list.ru.

Information about the author

Aleksandr Aleksandrovich Harnisheusky – Researcher, Scientific Production Unitary enterprise “Institute of Mining” (69, Kozlova Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: sigd@list.ru.

Поступила в редакцию 15.11.2021 г.

УДК 621.12:629.46

Н.В. Довгелюк, Е.М. Масловская, З.Ю. Толочко*УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь***УСИЛЕНИЕ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ
ПОД ОБРАЩЕНИЕ ДЛИННОСОСТАВНЫХ ТЯЖЕЛОВЕСНЫХ ПОЕЗДОВ**

Аннотация. В статье рассматривается одна из проблем обеспечения устойчивости земляного полотна железнодорожного пути при обращении тяжеловесных грузовых составов. Отдельные участки земляного полотна под воздействием возросших нагрузок при обращении тяжеловесных поездов теряют свою прочность и устойчивость. Для выполнения возросших требований по прочности и устойчивости земляного полотна в конструкцию нижнего строения железнодорожного пути вводятся новые элементы: защитный слой земляного полотна, основная площадка усиливается расстиланием геотекстиля или пенополистирола.

Предложена технологическая схема боковой присыпки к земляному полотну с однополосным производством работ по усилению земляного полотна, а также отсыпки контрбанкета или присыпки к нижней части высокой насыпи с двухполосным ведением работ.

Ключевые слова: прочность, устойчивость, земляное полотно, железная дорога, грузовой поезд, усиление.

N.V. Dovgelyuk, E.M. Maslovskaya, Z.Yu. Tolochko*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus***REINFORCEMENT OF THE RAILWAY ROADBED
FOR THE CIRCULATION OF LONG-COMPOSITE HEAVY-WEIGHT TRAINS**

Abstract. One of the problems of ensuring stability of railroad bed under the heavy-weight freight trains traffic is considered in the article. Certain sections of the subgrade bed lose their strength and stability under the influence of increased loads during the circulation of heavy freight trains. In order to meet the increased requirements for strength and stability of the earth bed, new elements, such as an earth bed protection layer, are introduced into the structure of the substructure of the railroad track and the basic platform is strengthened by spreading geotextile or polystyrene foam.

A technological scheme of lateral filler to the subgrade with a single-lane execution of works to strengthen the subgrade, as well as the backfill or filler to the lower part of the high embankment with a two-lane execution of works is proposed.

Keywords: strength, stability, earth bed, railroad, freight train, reinforcement.

Введение. В Государственной программе развития транспорта Республики Беларусь «Транспортный комплекс», подпрограмме 1 – «Железнодорожный транспорт» на 2021-2025 годы предусматривается комплексное развитие железнодорожной инфраструктуры для надежного, безопасного движения поездов, расширение использования электрической тяги для грузового и пассажирского движения [1].

При электрической тяге повышаются скорости движения [2-4], вводятся в обращение длинносоставные тяжеловесные грузовые поезда, развиваются пассажирские и грузовые транзитные перевозки, в том числе за счет пропуска ускоренных контейнерных поездов [5, 6]. Пропуск ускоренных, тяжеловесных поездов для безопасности движения требует устойчивого земляного полотна железнодорожного пути, что весьма актуально.

Земляное полотно железных дорог, как и все другие сооружения и устройства, должно обеспечивать непрерывную работу большой динамической системы – железно-дорожного пути. Для обеспечения прочности и устойчивости земляного полотна при обращении длинносоставных тяжеловесных поездов требуется его усиление [7, 8].

Для безопасного и стабильного обращения по железной дороге тяжеловесных поездов внедряются новые конструкции верхнего строения пути, повышаются требования к прочности и устойчивости земляного полотна (нижнего строения пути), в конструкцию вводятся новые элементы (такие, как защитный слой, основная площадка земляного полотна усиливается расстиланием геотекстиля или пенополистирола). Отдельные участки земляного полотна, считавшиеся прежде устойчивыми, в таких условиях не отвечают предъявляемым требованиям. Поэтому необходимо усиление существующего земляного полотна. Возможность применения того или иного способа зависит от местных условий: состояния основания насыпей, типа грунтов ядра насыпи и их влажности, наличия балластных шлейфов и других «болезней» земляного полотна, удаленности карьеров, где добываются дренирующие грунты, и возможностей организаций, занимающихся реконструкцией земляного полотна.

Основная часть. Боковая присыпка ведется грунтами, однородными с примененными в существующей насыпи или обладающими лучшими дренирующими свойствами. До начала земляных работ выполняется отнесение линий и устройств электро-снабжения, связи, сигнализации, централизации и блокировки, опор контактной сети, коммуникаций различного назначения.

При уширении существующего земляного полотна за счет боковых присыпок уплотняются стыки между старой и новой насыпью с обязательной проверкой качества уплотнения по стыку, а также откосной части. Усиление земляного полотна и удлинение прямо-отправочных путей на отдельных пунктах при переустройстве железной дороги под обращение тяжеловесных длинно-составных поездов состоит из подготовительных, основных и отделочных работ [9].

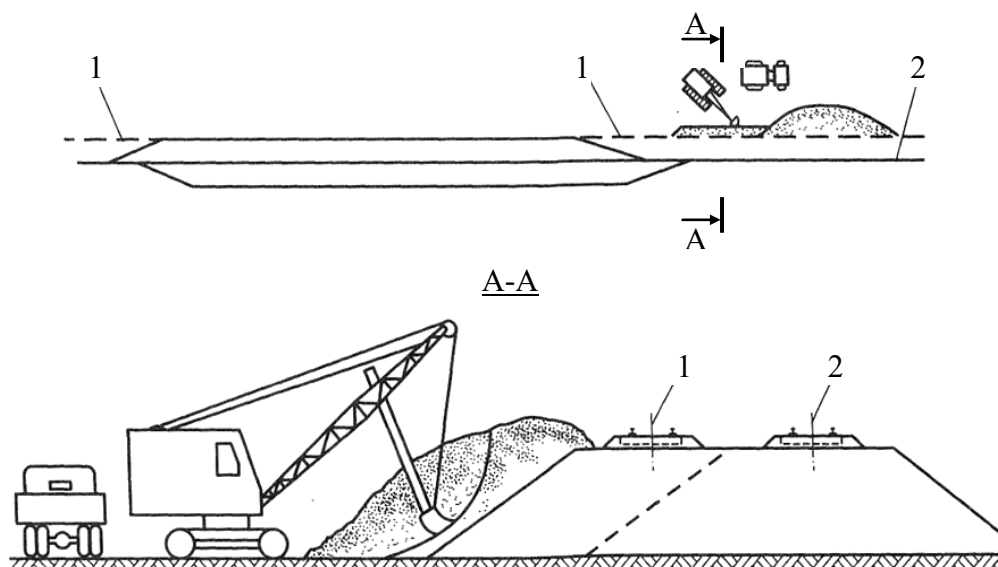
К подготовительным работам относятся: геодезическая разбивка усиливаемых частей земляного полотна; усиление или восстановление притрассовых автомобильных дорог, подъездов к объектам на трассе; приспособление их к движению большегрузного землевозного транспорта; сооружение временных дорог; ликвидация кюветов и лотков в местах уширения выемок; засыпка их грунтом, однородным с грунтом оснований, с тщательным послойным его уплотнением; устройство перегрузочных карьеров.

Перегрузочные карьеры с дренирующим грунтом устраиваются на отдельных пунктах в непосредственной близости от возводимой насыпи (рисунок 1). Высота насыпи разгрузочного пути 1 составляет 2-3 м. Протяженность разгрузочного пути равна длине землевозного состава (думкарной вертушки) из 16-20 вагонов. Расстояние между перегрузочными карьерами определяется с помощью технико-экономических расчетов, в которых учитываются затраты на устройство карьеров и стоимость перевозок грунта от карьера к месту укладки его в тело земляного полотна.

Выбираются сухие участки трассы с насыпями высотой до 2-3 м. Предварительно подготавливается площадка (очищенная от леса и кустарника, спланированная) для выгрузки грунта и уборки его за пределы габарита стругом. Карьеры, устраиваются с одной стороны насыпи.

К основным работам относятся боковые присыпки к нижней и верхней частям насыпи. К нижней части насыпи грунт присыпается с использованием экскаваторных и самосвальных модулей. Обязательной сопутствующей работой, выполняемой одновременно с основными, является нарезка уступов. Уступы проектируют шириной от 1 м до 1,5 м с устройством поперечного уклона, равного 0,02-0,04, в сторону поля. Объем ма-

териала на устройство одного уступа (шириной 1,0 м, высотой 0,7 м) на 1 км составляет 350 м^3 . Уступы нарезаются бульдозерами с откосниками одновременно с боковой присыпкой грунта к откосам насыпи (в ходе отсыпки слоев). После нарезки первого уступа отсыпают и уплотняются 2-3 слоя присыпки. Грунт, получаемый при нарезке (если он подходит по своим качествам), разравнивают ровным слоем по всей ширине присыпаемой части насыпи. Нарезка уступов относится к скрытым работам, выполняемым в присутствии представителя заказчика и оформляемым актом.



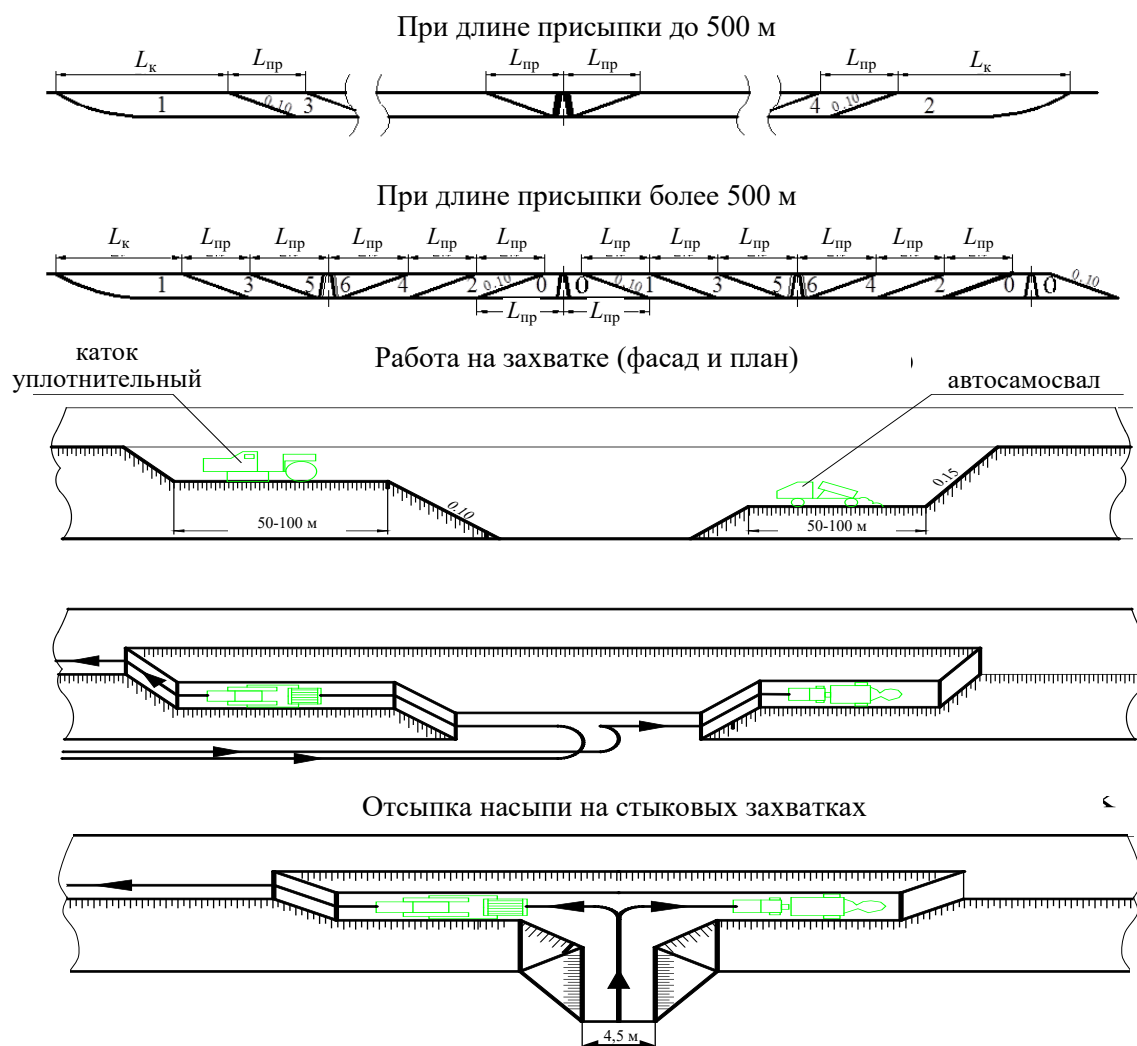
1 – ось разгрузочного пути; 2 – ось существующего пути
Рисунок 1. – Перегрузочный карьер грунта на раздельном пункте

Распределение грунта по слоям (толщина которых зависит от требуемого для нижней или верхней части насыпи нормативного коэффициента уплотнения и типа уплотняющего механизма) входит в состав основных земляных работ и контролируется работниками лаборатории механизированной колонны. Работы по нарезке уступов и послойной отсыпке земляного полотна выполняются в присутствии руководителя работ и работника дистанции пути (дорожного мастера), отвечающих за безопасность движения поездов. Если существующая насыпь сооружается из дренирующих грунтов, то в месте устройства уступов с откосов удаляется дерн, кустарники и деревья [9].

Эксплуатационные работы при усилении земляного полотна имеют ряд специфических особенностей. Во-первых, учитываются перерывы в работе техники для пропуска поездов. Это приводит к увеличению количества машин и, в конечном счете, к удорожанию земляных работ. Во-вторых, резко возрастает объем дополнительных работ, к которым относятся: разработка и отсыпка грунта в технологические земляные сооружения (въезды и съезды на насыпях и выемках, площадки для разворота автотранспорта, учитывающие их габариты), последующая ликвидация этих сооружений, нарезка уступов, срезка балластных шлейфов. Состав дополнительных работ различен при использовании разных технологических схем. В-третьих, образуется сравнительно узкая полоса подсыпанного грунта с боков насыпи. Минимальная ширина боковой подсыпки при однополосном ведении работ обеспечивает безопасный проезд автосамосвала и проход грунтоуплотняющей техники.

На рисунке 2 приведена схема однополосного ведения работ. Она используется при высоте присыпаемой нижней части насыпи 3-4 м. Расстояние, которое проходят

автосамосвалы до места укладки грунта задним ходом, по этой схеме составляет до 50 м. Работы на захватках ведутся попеременно, как это показано на рисунке 2. На четной захватке в правой части присыпаемой насыпи производится выгрузка грунта для формирования одного слоя и одновременно на нечетной захватке в левой части присыпаемой насыпи ведется разравнивание и уплотнение грунта. По завершении работ бульдозер и каток перемещаются на очередную захватку в левую часть насыпи, а автосамосвалы продолжают выгрузку грунта теперь уже на захватке в правой части насыпи.

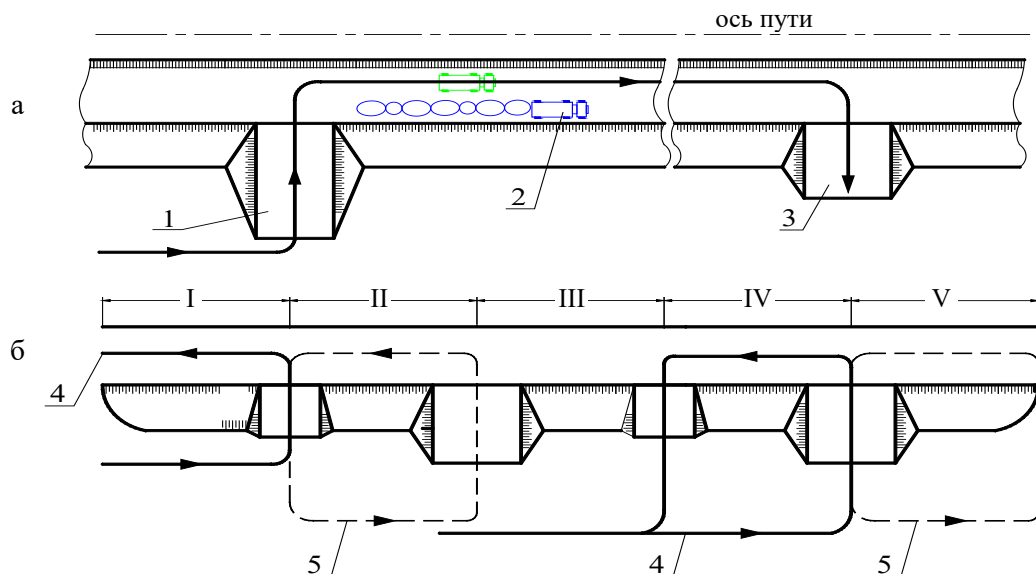


0-6 – номера захваток; L_k и $L_{пр}$ – длина концевых и промежуточных захваток
Рисунок 2. – Схема боковой присыпки с однополосным ведением работ

Присыпка грунта к существующему пути осуществляется по однополосной схеме ведения работ захватками длиной до 50 м. Автосамосвалы к месту укладки грунта подаются задним ходом. После заполнения захватки грунтом, рассчитанным на отсыпку одного слоя толщиной 35-40 см, производится его разравнивание бульдозером и уплотнение грунтоуплотняющей техникой, а автосамосвалы подают грунт (также задним ходом) на захватку, находящуюся с другой стороны участка.

При усилении насыпей с устройством контрбанкетов используется двухполосная схема с кольцевым движением автосамосвалов или с их разворотом на насыпи. Работы,

как это показано на рисунке 3, ведутся одновременно на двух захватках: на одной – разгружается грунт, на другой – разравнивается и уплотняется.



а – разгрузка грунта на захватке; б – кольцевое движение автосамосвалов;

I-V – захватки; 1 – въезд; 2 – автосамосвалы; 3 – съезд;

4 – кольцевое движение автосамосвалов на захватках I и IV;

5 – кольцевое движение катков при уплотнении грунта на захватках II и V

Рисунок 3. – Отсыпка контрбанкета или присыпка

к нижней части высокой насыпи с двухполосным ведением работ

Разгрузка грунта выполняется от начала захватки со стороны въезда автосамосвалов. Присыпки к насыпям высотой до 6 м сооружаются с одновременным устройством въездов и съездов. Въезды делаются в местах с повышенными отметками рельефа для уменьшения дополнительного объема грунта. Присыпки к насыпям высотой более 6 м и шириной, достаточной для организации работ по двухполосной схеме, ведутся только с устройством съездов.

Для заезда на насыпь автосамосвалов и другой техники используются нулевые места на отметке отсыпаемого слоя. Насыпи протяженностью до 500 м возводятся без устройства съездов одной захваткой. Автосамосвалы во время разравнивания и уплотнения грунта (так же как и грунтоуплотняющая машина во время отсыпки слоя) используются на смежных участках работ.

Во всех остальных случаях боковая присыпка верхней части усиливаемых высоких насыпей осуществляется поездной возкой грунта по существующему пути. Нижняя часть боковой присыпки (на высоту до 3 м) отсыпается по однополосной схеме ведения работ.

В присыпаемую верхнюю часть насыпи грунт с действующего пути выгружается из думпкаров с откидным бортом (при высоте существующей насыпи до 5 м) или из думпкаров с подъемным бортом (при высоте насыпи до 3 м). Разгрузка землевозного поезда с действующего пути на перегонах производится во время «окон» без дополнительной передвижки вагонов в зависимости от толщины отсыпаемого слоя присыпки и емкости думпкаров.

Грунт с откоса и обочин существующего пути перемещается путевым стругом, путевой машиной СЗП-600 (при работе плугом с последующей планировкой после уп-

лотнения), экскаватором-планировщиком, который находится на спланированной нижней части насыпи.

Отсыпка и уплотнение производится послойно. После выгрузки очередной партии дренирующего грунта он послойно разравнивается бульдозером и уплотняется катками. Экскаватор перемещается на соседний участок. Бульдозером с откосником нарезается очередной уступ, и операция повторяется.

Откосная часть балластной призмы существующего пути во избежание ее засорения дренирующим грунтом перед разгрузкой думпкаров покрывается мешковиной, полиэтиленовой пленкой или щитами. После сдвижки грунта в присыпаемую часть насыпи защитное покрытие снимается и используется на следующем участке.

Потребность в думпках определяется с учетом коэффициента уплотнения грунта. Уплотнение грунта производится мощными виброкатками, уплотняющими слой высотой до 0,7 м. Если ширина присыпаемой верхней части насыпи не позволяет разместить виброкаток, то для уплотнения откосной части используется навесное оборудование к крану на железнодорожном ходу.

Заключение.

Обращение на железной дороге тяжеловесных, длинно-составных грузовых поездов требует разработки новых решений по повышению прочности и устойчивости земляного полотна (нижнего строения пути). Для этого в конструкцию вводятся новые элементы: защитный слой основания, основная площадка земляного полотна усиливается расстиланием геотекстиля или пенополистирола.

Предложена технологическая схема боковой присыпки к земляному полотну с однополосным производством работ по усилению земляного полотна, а также отсыпки контрбанкета или присыпки к нижней части высокой насыпи с двухполосным ведением работ в условиях движения длинносоставных тяжеловесных грузовых поездов для повышения безопасности и бесперебойности движения.

Список использованных источников

1. Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь // Государственная программа «Транспортный комплекс», подпрограмма «Железнодорожный транспорт» на 2021-2025 годы. Постановление Сов. Мин. № 165 от 23.03.2021 [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа: pravo.by/upload/docs/op/C22100165_1616792400.pdf. – Дата доступа: 30.09.2021.
2. Кантор, И.И. Высокоскоростные железнодорожные магистрали: трасса, подвижной состав, магнитный подвес: учеб. пособие / И.И. Кантор. – М.: Маршрут, 2004. – 51 с.
3. Негрей, В.Я. Целесообразность электрификации участков железной дороги / В.Я. Негрей, М.А. Масловская // Вестник Украинского гос. у-та ж. д. трансп. – 2018. – № 62. – С. 96-104.
4. Масловская, М.А. Особенности реконструкции железных дорог при электрической тяге: учеб.-метод. пособие по курсовому и дипломному проектированию / М.А. Масловская, Н.В. Довгелюк. – Гомель: БелГУТ, 2018. – 62 с.
5. Масловская, М.А. Развитие электрифицированной сети Белорусской железной дороги / М.А. Масловская // Энергоэффективность. – 2019. – № 8. – С. 29-32.
6. Масловская, М.А. Перспективы развития электрифицированной сети Белорусской железной дороги / М.А. Масловская, Н.В. Довгелюк // Развитие экономической науки на транспорте: экономическая основа будущего транспортных систем:

материалы VII Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 19 дек. 2019 г. / ФГБОУ ВО ПГУПС. – Санкт-Петербург, 2019. – С. 509-515.

7. Довгелюк, Н.В. Реконструкция железных дорог: учеб. пособие / Н.В. Довгелюк, Г.В. Ахраменко, В.А. Вербило; М-во трансп. и коммуникаций РБ, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2017. – 339 с.

8. Довгелюк, Н.В. Целесообразность использования большегрузных вагонов в составе грузового поезда / Н.В. Довгелюк, М.А. Масловская. З.Ю. Толочко // Горная механика и машиностроение. – 2019. – № 4. – С. 60-66.

9. Экономика железнодорожного строительства и путевого хозяйства: учеб. для вузов / под ред. Б.А. Волкова, В.Б. Шульги. – М.: Маршрут, 2003. – 630 с.

Информация об авторах

Наталья Владимировна Довгелюк – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Проектирование, строительство и эксплуатация транспортных объектов», УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: tsar_irina@mail.ru.

Елена Михайловна Масловская – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Транспортно-технологические машины и оборудование», УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: tsar_irina@mail.ru.

Злата Юрьевна Толочко – студентка строительного факультета, УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: tsar_irina@mail.ru.

Information about the authors

Natalia Vladimirovna Dovgelyuk – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department “Design, Construction and Operation of Transport Facilities”, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: tsar_irina@mail.ru.

Elena Mihaylovna Maslovskaya – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department “Transport and technological machinery and equipment”, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: tsar_irina@mail.ru.

Zlata Yuryevna Tolochko – student of the Faculty of Civil Engineering, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: tsar_irina@mail.ru.

Поступила в редакцию 30.09.2021 г.

УДК 656.21:624.131.543

Н.В. Довгелюк, Е.М. Масловская, А.А. Царенков*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Беларусь***ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ В РАЙОНАХ
С ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТЬЮ СКЛОНОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА**

Аннотация. В статье выполнен анализ причин возникновения неустойчивых оползневых косогоров, которые нарушают безопасность движения поездов. Основные из них: районы с большим количеством выпадающих осадков и неблагоприятные геологические условия. Приводятся рекомендуемые защитные сооружения, имеющие специфические особенности стабилизации оползневого склона, и новые дренажные устройства, отводящие воду со склона или понижающие уровень воды у земляного полотна.

Ключевые слова: безопасность движения, оползень, склон, земляное полотно, дренаж, осадки, поезд, железная дорога.

N.V. Dovgelyuk, E.M. Maslovskaya, A.A. Tsarenkov*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus***IMPROVING THE SAFETY OF TRAIN TRAFFIC IN AREAS
WITH LANDSLIDE HAZARD OF EARTH BED SLOPES**

Abstract. The paper analyzes the causes of unstable landslide slopes, which violate the safety of train traffic. The main ones are: areas with a large amount of precipitation and unfavorable geological conditions. Recommended protective structures with specific features of landslide slope stabilization and new drainage devices, diverting water from the slope or lowering the water level near the earth bed, are given.

Keywords: traffic safety, landslide, slope, earth bed, drainage, precipitation, train, railroad.

Введение. Программой развития транспортного комплекса республики Беларусь на 2021-2025 годы предусматривается дальнейшая электрификация железнодорожных участков, комплексное развитие железнодорожной инфраструктуры для надежного и безопасного выполнения графика движения поездов всех категорий, приобретение инновационных транспортных средств: электровозов и электропоездов, которые обеспечат повышение качества выполнения грузовых и пассажирских перевозок [1].

Решение задач подпрограммы 1 «Железнодорожный транспорт» позволит расширить транзитный потенциал Белорусской железной дороги. Большое внимание уделено в программе повышению скорости движения пассажирских поездов, обращению длинносоставных тяжеловесных поездов, развитию грузовых перевозок в направлении Китай – Западная Европа в рамках инициативы «Один пояс – Один путь», в том числе за счет пропуска ускоренных контейнерных поездов [2-5].

При следовании тяжеловесного поезда по существующему пути, запроектированному по старым нормам, возникают «расстройства» в конструкции верхнего строения пути и в земляном полотне. Нарушается его прочность и устойчивость. Поэтому весьма актуальным для обеспечения безопасности движения поездов является усиление земляного полотна, повышение устойчивости его откосов, обеспечение надежного водоотвода с использованием различных дренажных систем и водопропускных сооружений.

Основная часть. Для участка трассы железнодорожной линии при строительстве и подрезке склонов ожидается образование оползней двух видов.

Первый – неглубокие сплывы пластического течения, связанные в основном с глинистыми отложениями делювия и пролювия. Второй вид – глубокие оползни скольжения со смещением по склону более древних оползневых тел при подмыве рекой береговых склонов. Фактор подмыва подошвенной части оползней рекой является основным фактором дестабилизации оползней дополнительно к сильному обводнению склонов за счет осадков, таянию и удержанию талых вод на поверхности склона за счет повсеместно развитой обильной растительности. Встречаются и более сложно построенные оползневые участки, связанные с системами трещин бортового отпора высоких склонов. Оползни блочного типа находятся обычно в верхних частях крутых склонов. Медленные пластические смещения не имеют четко выраженных контуров отрыва. Признаком их часто являются наклоненные вниз по склону деревья, слабоволнистая поверхность склона.

Наличие оползневых участков на откосах выемок железной дороги может нарушить безопасность движения поездов, особенно в неблагоприятных геологических условиях и районах с большим количеством выпадающих осадков [6, 7].

Вдоль трассы есть участки выемок, характеризующиеся протяженными склонами, имеющими оползневой характер. Существующее состояние склонов характеризуется наличием бессистемных локальных вырубков, грунтовых дорог с плохой организацией отвода поверхностных вод. Они образованы до придания этим участкам охраняемых территорий, тем не менее, сейчас продолжается их негативное влияние на оползневую опасность склонов.

Проектируемые защитные сооружения имеют выраженные особенности: со стороны реки – это в основном сооружения, защищающие земляное полотно от размыва и сползания в реку; с нагорной стороны – комплекс сооружений, обеспечивающих стабилизацию оползневого склона и земляного полотна за счет снижения уровня воды через сетевое дренирование, подпорные сооружения и стенки из свай, железобетона, армогрунтовых дамб, формирование укрепленных откосов (склонов) с одновременной защитой поверхностного слоя от эрозии.

Гидрогеологические особенности рельефа местности вдоль трассы характеризуются тем, что коренные несмешиваемые породы залегают довольно глубоко и покрыты слоем грунта мощностью до 8 м, сильно подверженного набуханию и размыву, имеющего слабую несущую способность. Часто такие склоны представляют собой разнонаправленные наслоения ранее сошедших и стабилизированных оползней со вторично сложившимся режимом естественного дренирования поверхностных и грунтовых вод.

Сильная залесенность придает некоторую дополнительную стабильность склонам в нетронutom (природном) состоянии, однако одновременно способствует задержанию и накоплению в толще грунта больших объемов поверхностных и грунтовых вод. Прокладка трассы и земляного полотна в большинстве случаев приводит к пересечению естественно сложившихся путей сброса воды со склонов в реку, что создает серьезные трудности для обеспечения транзита водных потоков через конструкцию земляного полотна и разгрузки самого склона выше трассы. Дополнительных мероприятий требуют образующиеся зоны понижения между склоном и вновь отсыпанным земляным полотном, склонные к заболачиванию после паводков в результате встречных потоков через дренаж земляного полотна.

Анализ оползневой опасности склонов в большинстве случаев показывает, что склоны находятся в условно-стабильном равновесном состоянии, но требуют принятия

мер по стабилизации (в основном водоотвод и сетевой дренаж) выше предполагаемых выработок еще до начала земляных работ, связанных с подрезкой склонов.

В связи с этим, основное предпочтение при проектировании отдается выбору решений, обеспечивающих сбор и водопонижение на нагорной стороне трассы: мощный дренаж сквозь тело земляного полотна, подпор оползневых масс выше земляного полотна, а также стабилизацию откосов с подгорной стороны, включая мероприятия по предотвращению размывов в зонах выхода дренажей и других водопропускных сооружений.

В существующих гидрогеологических условиях при слабых несвязных грунтах следует руководствоваться принципом минимального воздействия на склон при уположении для предотвращения эрозии, сохранения сложившегося равновесного состояния оползневых склонов, сокращения вырубков. Поэтому при значительных площадях, образующихся при уположении склонов, предпочтение отдается устройству подпорных сооружений в виде стен, армогрунтовых конструкций.

Конструкции защитных подпорных сооружений при существующих грунтах и структуре склонов, а также в условиях сейсмичности должны обладать высокой эластичностью, малой удельной нагрузкой на основание, хорошими водопропускными (дренажными) свойствами. Этими качествами в большой мере обладают армогрунтовые сооружения. Их устройство также позволяет обеспечивать значительную крутизну откосов (до 70°), что важно для минимального воздействия на склон и сокращения площадей откосов при уположении, а также совмещенную функцию подпора оползневых масс в сочетании с удержанием осыпей по склону и организацией эффективного водоотвода с верхней части склона. Дополнительным аргументом в пользу выбора этих решений является также их естественный природный внешний вид, возможность декорирования растениями с целью дополнительного укрепления и защиты от ультрафиолетового излучения, хорошая ремонтпригодность и максимальное использование местных материалов.

Подпорные сооружения (стенки) из бетона, бутобетона и свай применяются в случаях глубоких выемок, однако их применение помимо конструктивных преимуществ ограничено сложностями доставки больших объемов бетона к месту заливки.

Для стабилизации оползневых склонов помимо обеспечения подпора оползневых масс важнейшим требованием является эффективный сбор и отвод поверхностных талых и дождевых вод [8]. Это обеспечивается устройством открытых канав, перехватывающих потоки, приходящие с верхних склонов или собирающиеся на пологих участках и сети закрытых дренажей, распределенных непосредственно по телу оползня (рисунок).

Важной особенностью конструкции дренажной траншеи с большой пропускной способностью является отделение собственно дренирующей части канавы от водопропускной (транзитной) зоны. Такое решение позволяет эффективно собирать воду с большой поверхности, не перегружая сечение дренажа в нижней части, уравнивая дренирующую способность на верхних и нижних участках, так как избыточная вода с верхних зон транзитом транспортируется вниз, не перегружая дренажную трубу транспортной функцией. В результате исключаются застой и заиливание, повышается пропускная способность при тех же геометрических параметрах, увеличивается рабочая протяженность дренажа, повышается «живучесть» системы, так как дренажные участки работают не последовательно, а независимо, периодически разгружаясь на нижнюю трубу.

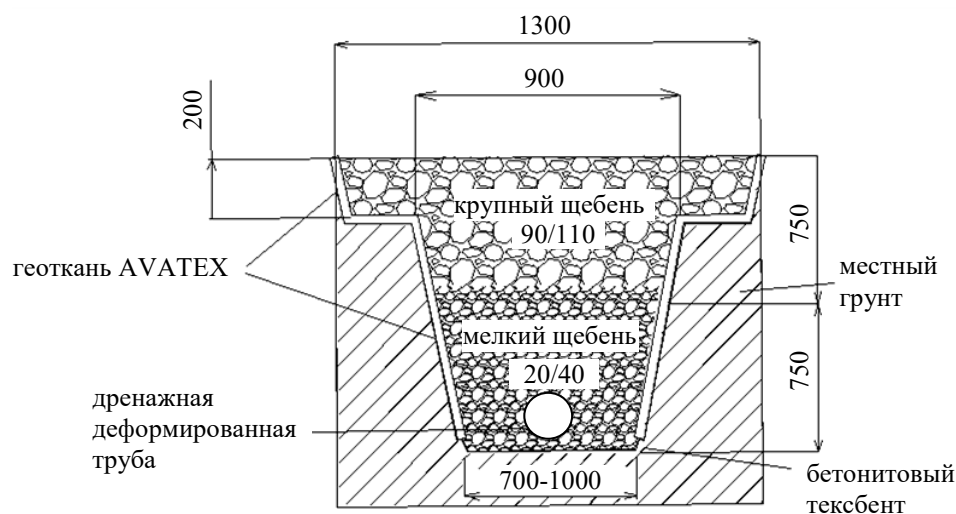


Рисунок. – Дренаж «елочка»

Для случаев небольшой крутизны склонов, отсутствия больших перепадов и коротких секций (до 30 м) используется также однотрубная система. Для сбора воды с большой поверхности устраиваются дренажные сети типа «елочка» (рисунок), транзитные трубопроводы соединяются через колодцы в узлах. Колодцы используются корпусные, пластиковые или железобетонные, или представляют собой цилиндрическую выемку в грунте, выстланную изнутри бетонитовыми матами или толстой пленкой. После укладки труб и разделительной мембраны выемка полностью заполняется камнем. Дренажи подобного типа в виде поперечных прорезей с сечением 1×1 м устраиваются также под земляным полотном поперек в основании с шагом от 6 м до 10 м и служат для сбора воды из тела насыпи и транзитного сброса верхней воды из нагорного продольного дренажа или лотка. Такая конструкция позволяет резко сократить потребности в скальном дренирующем основании.

Преимущество таких водопропускных сооружений перед трубными системами в условиях слабых грунтов, нестойких к размыву, заключается в устранении кумулятивного эффекта, т.е. водный поток дробится на множество ручейков с малой скоростью и энергией, недостаточной для размыва, к тому же распределенных на большой площади. Устраивается постель из каменной наброски в зоне истечения (выхода) дренажных канав и транзитных трубопроводов.

Конструкция дренажа двухтрубной системы используется в случаях, когда протяженность дренажей превышает 40-50 м, а параллельное расположение невозможно по склоновым условиям. В остальных случаях применяются однотрубные системы как более экономичные. В узлах соединения дренажей с целью коммутации, согласования уровней и ревизии локальных ветвей устраиваются колодцы из железобетонных колец или, в случае сильной затрудненности с доставкой и монтажом инвентарных железобетонных изделий, в виде грунтовой ямы с гидроизолирующей оболочкой.

В составе дренажной сети предусмотрены открытые канавы на бермах и склонах, дождеприемники (поглотительные дренажные траншеи) и сбросные линии. Возможен самотечный отвод воды по дренажной сети к внешним водоотводящим устройствам и далее к установленным местам сброса вод.

Прием воды в сбросную линию из открытых канав дождевой сети и закрытых дренажей осуществляется через приемные колодцы.

Выводы.

1. Предложенная конструкция дренажной траншеи с большой пропускной способностью имеет особенность отделения собственно дренирующей части канавы от транзитной зоны. Это позволяет эффективно собирать воду с большой поверхности, не перегружая сечение дренажа в нижней части, уравнивая дренирующую способность на верхних и нижних участках, так как избыточная вода с верхних зон транзитом течет вниз, не перегружая дренажную трубу транспортной функцией. Поэтому исключаются застои и заиливание, повышается пропускная способность при тех же геометрических параметрах, увеличивается рабочая протяженность дренажа, повышается устойчивость системы, так как дренажные участки работают не последовательно, а независимо, периодически разгружаясь на нижнюю трубу.

2. При небольшой крутизне склонов используется однотрубная система. Для сбора воды с большой поверхности устраиваются дренажные сети типа «елочка», транзитные трубопроводы соединяются через колодцы в узлах. Колодцы представляют собой цилиндрическую выемку в грунте, выстланную изнутри бетонитовыми матами или толстой пленкой. После укладки труб и разделительной мембраны выемка полностью заполняется камнем. Дренажи подобного типа в виде поперечных прорезей устраиваются также под земляным полотном и служат для сбора воды из тела насыпи и сброса верхней воды из нагорного продольного дренажа. Такая конструкция позволяет резко сократить потребности в скальном дренирующем основании земляного полотна, больше использовать местные грунты.

3. Преимущество предложенных водопропускных сооружений перед трубными системами в условиях слабых грунтов, нестойких к размыву, заключается в том, что водный поток дробится на множество ручейков с малой скоростью и энергией, недостаточной для размыва. Устраивается постель из каменной наброски в зоне выхода дренажных канав и транзитных трубопроводов.

Список использованных источников

1. Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь // Государственная программа «Транспортный комплекс», подпрограмма «Железнодорожный транспорт» на 2021-2025 годы. Постановление Сов. Мин. № 165 от 23.03.2021 [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа: pravo.by/upload/docs/op/C22100165_1616792400.pdf. – Дата доступа: 30.09.2021.

2. Негрей, В.Я. Целесообразность электрификации участков железной дороги / В.Я. Негрей, М.А. Масловская // Вестник Украинского гос. у-та ж. д. трансп. – 2018. – № 62. – С. 96-104.

3. Масловская, М.А. Развитие электрифицированной сети Белорусской железной дороги / М.А. Масловская // Энергоэффективность. – 2019. – № 8. – С. 29-32.

4. Масловская, М.А. Перспективы развития электрифицированной сети Белорусской железной дороги / М.А. Масловская, Н.В. Довгелюк // Развитие экономической науки на транспорте: экономическая основа будущего транспортных систем: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 19 дек. 2019 г. / ФГБОУ ВО ПГУПС. – Санкт-Петербург, 2019. – С. 509-515.

5. Довгелюк, Н.В. Целесообразность использования большегрузных вагонов в составе грузового поезда / Н.В. Довгелюк, М.А. Масловская. З.Ю. Толочко // Горная механика и машиностроение. – 2019. – № 4. – С. 60-66.

6. Довгелюк, Н.В. Реконструкция железных дорог: учеб. пособие / Н.В. Довгелюк, Г.В. Ахраменко, В.А. Вербило; М-во трансп. и коммуникаций РБ, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2017. – 339 с.

7. Турбин, И.В. Изыскания и проектирование железных дорог: учеб. для вузов / И.В. Турбин. – М.: Транспорт, 1989. – 479 с.

8. Ахраменко, Г.В. Определение отверстий малых водопропускных сооружений: учеб.-метод. пособие по курсовому и дипломному проектированию / Г.В. Ахраменко, Н.В. Довгелюк, В.А. Вербило. – Гомель: БелГУТ, 2004. – 42 с.

Информация об авторах

Наталья Владимировна Довгелюк – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Проектирование, строительство и эксплуатация транспортных объектов», УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: tsar_irina@mail.ru.

Елена Михайловна Масловская – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Транспортно-технологические машины и оборудование», УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: tsar_irina@mail.ru.

Александр Андреевич Царенков – студент строительного факультета, УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: tsar_irina@mail.ru.

Information about the authors

Natalia Vladimirovna Dovgelyuk – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department “Design, Construction and Operation of Transport Facilities”, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: tsar_irina@mail.ru.

Elena Mihaylovna Maslovskaya – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department “Transport and technological machinery and equipment”, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: tsar_irina@mail.ru.

Alexandr Andreevich Tsarenkov – student of the Faculty of Civil Engineering, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: tsar_irina@mail.ru.

Поступила в редакцию 30.09.2021 г.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.232.83:622.243.56.054(045)

Г.А. Басалай

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь***ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРИВОДА БЕРМОВЫХ ФРЕЗ И ОТРЕЗНЫХ КРОНОК ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА С СООСНЫМИ РОТОРАМИ**

Аннотация. Проведен анализ объединенного привода бермовых фрез, отрезных кронок и масляных насосов проходческого комбайна с соосными роторами. Разработана динамическая модель привода бермовых фрез и отрезных кронок. Сформированы основные абстрактные элементы, наделенные определенными физическими свойствами: инерционные элементы, способные накапливать кинетическую энергию; упругие элементы, способные накапливать потенциальную энергию; диссипативные элементы, отображающие свойства рассеивания энергии; трансформаторные элементы, отображающие безынерционные преобразования параметров потока энергии, осуществляемые техническими устройствами. В динамических системах исполнительных органов сформулированы внешние воздействия типа потенциала, соответствующие активным моментам двигателя и реактивным нагрузкам на бермовые фрезы и отрезные кроноки.

Ключевые слова: проходческий комбайн, бермовые фрезы, отрезные кроноки, привод, динамическая модель.

R.A. Basalai

*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus***DYNAMIC MODEL OF THE DRIVE OF THE BURM MILLING CUTTERS AND CUTTING CROWNS OF A TUNNELING COMBINE WITH COAXIAL ROTORS**

Abstract. The analysis of the combined drive of the boom cutters, cutting crowns and oil pumps of the tunneling combine with coaxial rotors is carried out. A dynamic model of the drive of berms and cutting crowns has been developed. The basic abstract elements endowed with certain physical properties are formed: inertial elements capable of accumulating kinetic energy; elastic elements capable of accumulating potential energy; dissipative elements displaying energy dissipation properties; transformer elements displaying inertialess transformations of energy flow parameters carried out by technical devices. In the dynamic systems of the executive bodies, external influences of the potential type are formulated, corresponding to the active moments of the engine and reactive loads on the boom cutters and cutting crowns.

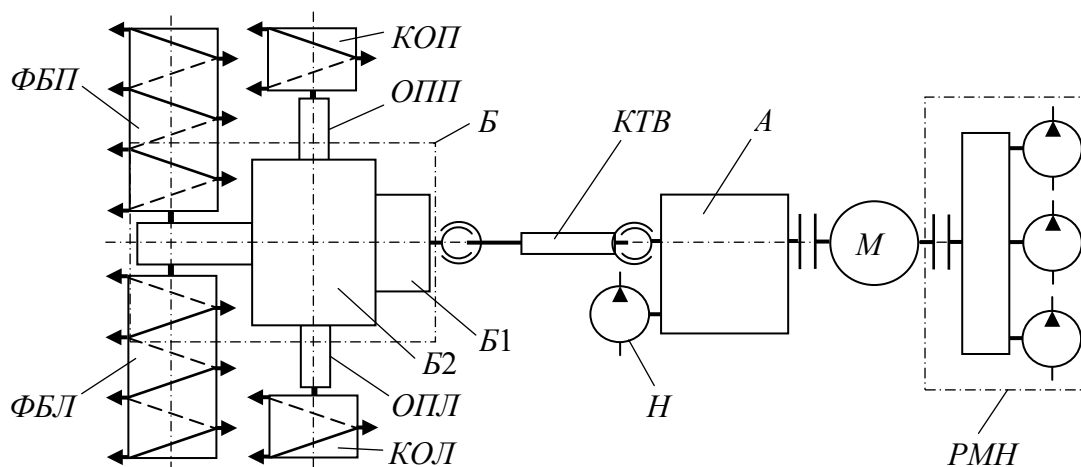
Keywords: tunneling combine, burm milling cutters, cutting crowns, drive, dynamic model.

Введение. Проходческие комбайны с соосными роторами широко применяются на рудниках при разработке пластовых месторождений калийных солей. Они обеспечивают проходку подготовительных выработок арочной формы при формировании шахтных полей для отработки плодородных пластов очистными комплексами. Фрезерование массива горных пород осуществляется соосными роторами, бермовыми фрезами и отрезными кроноками при поступательном движении комбайна на забой [1, 2]. Соосные роторы отрабатывают круглую форму забоя диаметром 3,0 м, а бермовые фрезы и отрезные кроноки формируют поперечное сечение выработки прямоугольным. Из-за

напластования фрезеруемых пород сильвинита и галита, имеющих значительную разницу в прочностных свойствах, приводы исполнительных органов комбайна подвержены значительным динамическим нагрузкам. В связи с этим задачи модернизации конструкций и методов проектного расчета приводов исполнительных органов проходческих комбайнов актуальны и в настоящее время.

Цель работы – разработка динамической модели привода бермовых фрез и отрезных коронок проходческого комбайна с соосными роторами.

1. Анализ объединенного привода бермовых фрез, отрезных коронок и масляных насосов проходческого комбайна. Проходческие комбайны типа ПК-8МА, ПКС-8М и КРП-3 имеют однотипные приводы бермовых фрез и отрезных коронок, а также масляных насосов. Структурная кинематическая схема объединенного привода приведена на рисунке 1. Этот привод включают в себя электродвигатель *М* мощностью 110 кВт с двумя выходными валами ротора, два редуктора *А*, *Б* привода бермовых фрез и отрезных коронок, кинематически соединенных последовательно посредством карданного телескопического вала *КТВ*, а также распределительный цилиндрический редуктор *РМН* масляных насосов.



РМН – редуктор масляных насосов; *Н* – насос; *КТВ* – карданный телескопический вал; *ФБП*, *ФБЛ* – фреза бермовая правая и левая, соответственно; *КОП*, *КОЛ* – коронка отрезная правая и левая, соответственно; *А*, *Б* – редукторы привода бермовых фрез, отрезных коронок; *Б1* – блок конического зацепления зубчатых колес; *Б2* – блок трехступенчатого зацепления цилиндрических колес; *ОПЛ*, *ОПП* – опоры промежуточные левая и правая, соответственно

Рисунок 1. – Структурная кинематическая схема привода бермовых фрез, отрезных коронок и масляных насосов

В приводе бермовых фрез и отрезных коронок первый редуктор *А* – это двухступенчатый соосный цилиндрический редуктор. К хвостовику промежуточного вала редуктора *А* присоединен насос *Н* гидролинии для принудительной смазки редуктора привода соосных роторов. Второй редуктор *Б* – распределительный четырехступенчатый коническо-цилиндрический редуктор, включает в себя блок *Б1* пары конических зубчатых колес и блок *Б2*, состоящий из трех пар цилиндрических зубчатых колес. В блоке *Б2* имеется два ведомых вала, к хвостовикам одного из них слева и справа присоединены бермовые фрезы *ФБЛ*, *ФБП*, а к хвостовикам другого слева и справа через промежуточные опоры *ОПЛ*, *ОПП* присоединены отрезные коронки *КОЛ*, *КОП*, соответственно. Частота вращения бермовых фрез равна 21 об/мин, отрезных коронок – 42 об/мин. Диаметры бермовых фрез и отрезных коронок по концам режущих кромок

зубков равны 0,6 м. По ширине эти параметры равны 1,3 м и 0,4 м, соответственно. Встречное вращение валов бермовых фрез и отрезных коронок по отношению к поступательному движению комбайна в рабочем режиме обеспечивает эффективное перемещение сфрезерованной горной породы одновременно вперед и к центру продольной оси симметрии машины. Это обеспечивает значительную стабилизацию суммарного реактивного момента на корпус комбайна от сил сопротивления фрезерованию массива горной породы и перемещения методом волочения по почве выработки горной массы шнеками бермовых фрез в зону зачерпывания ее ковшами внешнего ротора для загрузки на ленточный конвейер [3, 4].

Площадь забоя обрабатывается двумя бермовыми фрезами ($S_{фб} = 0,824 \text{ м}^2$), двумя отрезными коронками ($S_{ко} = 0,141 \text{ м}^2$) и основным исполнительным органом – центральным ротором в сочетании с четырехлучевой ковшовой рамой ($S_{рс} = 7,065 \text{ м}^2$). Расчеты, проведенные в работе [4], показывают, что суммарная мощность для работы бермовых фрез и отрезных коронок может достигать, соответственно $N_{фб} = 24,1 \text{ кВт}$ и $N_{ко} = 4,1 \text{ кВт}$. При этом мощность, реализуемая масляными насосами на привод гусениц в рабочем режиме проходческого комбайна при полностью загруженном бункере-перегрузателе, составляет всего 3,47 кВт. Таким образом, соотношение потребляемых мощностей от общего электродвигателя в рассматриваемом приводе бермовых фрез, отрезных коронок, с одной стороны, и масляных насосов, с другой стороны, равно примерно 8 : 1. Помимо количественного преобладания потребляемой мощности на привод бермовых фрез и отрезных коронок над приводом масляных насосов, следует отметить, что в рабочем положении комбайна при фрезеровании массива породы основная динамическая нагрузка в объединенном приводе исходит в основном от бермовых фрез и отрезных коронок. По этой причине с целью упрощения столь сложной схемы привода автором принято решение влиянием динамических нагрузок от редуктора масляных насосов пренебречь, а следовательно, в данной работе разработана только динамическая модель привода бермовых фрез и отрезных коронок. В дальнейшем при численном анализе будет учитываться только часть мощности электродвигателя без среднего значения составляющей мощности на привод масляных насосов.

2. Динамическая модель привода бермовых фрез и отрезных коронок. Как отмечалось в работах [5, 6] бермовые фрезы и отрезные коронки в сборе с электромеханическими приводами проходческих комбайнов типа ПК-8, ПКС-8 и КРП-3 относятся к многомерным динамическим системам, состоящим из большого числа взаимодействующих между собой и с внешней средой элементов. Только по взаимному зацеплению зубчатых колес в приводе бермовых фрез и отрезных коронок это количество составляет 8, а по сопряжению элементов – более 10. Взаимодействие с внешней средой, т.е. горной породой, можно оценивать суммарными крутящими моментами, приведенными к валам бермовых фрез и отрезных коронок, хотя в моделях более высокого уровня следовало бы учитывать характер взаимодействия каждого зубка на этих исполнительных органах. Математические модели таких систем – модели макроуровня. Объект исследования в модели макроуровня представляется как динамическая система с сосредоточенными параметрами, описываемая системой обыкновенных дифференциальных уравнений.

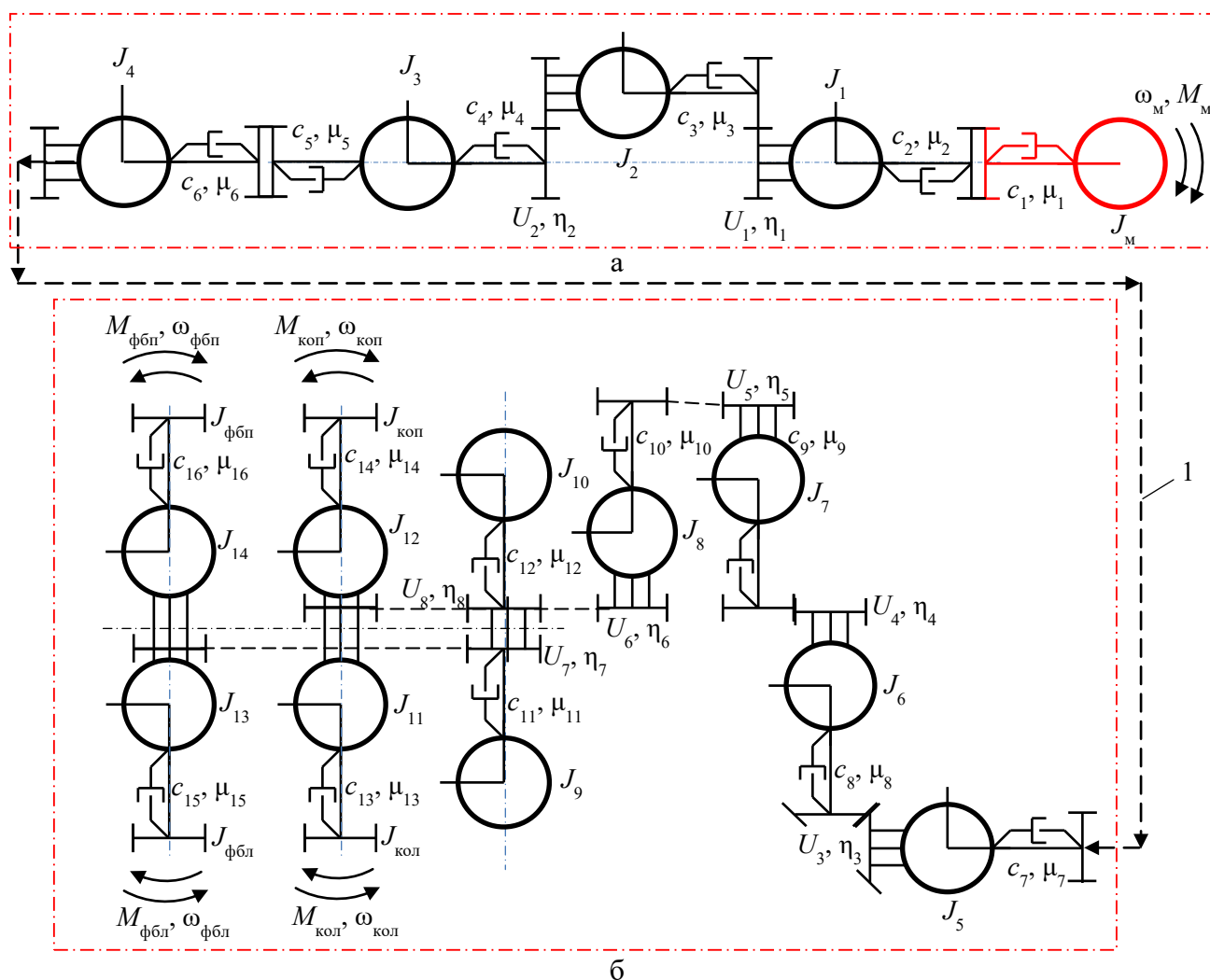
Унифицированная динамическая модель трансмиссии привода бермовых фрез и отрезных коронок комбайнов формировалась на основе принципиальных кинематических схем и сборочных чертежей конструкторского бюро завода-изготовителя (ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством») на выше рассмотренный привод с учетом скоростей вращения двигателя ω_m , а также бермовых фрез $\omega_{фб}$, и отрезных коронок $\omega_{ко}$.

Разработка динамической модели привода бермовых фрез и отрезных коронок, как абстрактного графического отображения основных физических свойств техниче-

ского объекта и характеристик взаимодействия с внешней средой, осуществлялась с применением метода сосредоточенных масс. При этом выделялись некоторые абстрактные элементы, наделенные определенными физическими свойствами: инерционные элементы J_M ; $J_1 - J_{14}$, $J_{фбл}$, $J_{фбп}$, $J_{кол}$, $J_{коп}$, способные накапливать кинетическую энергию; упругие элементы $c_1 - c_{16}$, обладающие способностью накапливать потенциальную энергию; диссипативные элементы $\mu_1 - \mu_{16}$, обладающие свойствами рассеивания энергии; трансформаторные элементы $U_1, \eta_1 - U_8, \eta_8$, отображающие безынерционные преобразования параметров потока энергии, осуществляемые техническими устройствами, называемыми трансформаторами.

На динамическую систему привода бермовых фрез и отрезных коронок действуют внешние воздействия типа потенциала: $M_M, M_{фбп}, M_{фбл}, M_{коп}, M_{кол}$ – внешние воздействия, соответствующие моментам двигателя, а также двух бермовых фрез и двух отрезных коронок.

Унифицированная динамическая модель привода бермовых фрез и отрезных коронок проходческого комбайна представлена на рисунке 2.



а – динамическая модель электродвигателя, соосного редуктора и карданного телескопического вала; б – модель раздаточного коническо-цилиндрического редуктора с бермовыми фрезами и отрезными коронками; 1 – линия энергетической связи блоков а-б

Рисунок 2. – Динамическая модель привода бермовых фрез и отрезных коронок проходческого комбайна

На основании динамической модели структурно-матричным методом, подробно описанном в [7], в настоящее время формируется математическая модель в виде систем компонентных и топологических уравнений. При ее численном анализе будут использованы результаты натурных испытаний проходческого комбайна КРП-3 на руднике 5 РУ ОАО «Беларуськалий», проведенных по методике, разработанной автором.

Выводы.

1. В работе представлена структурная схема объединенного привода бермовых фрез, отрезных коронок и масляных насосов от общего электродвигателя, а также выполнен анализ их энергетических показателей.

2. Разработана динамическая модель только привода бермовых фрез и отрезных коронок, т.к. влияние на двигатель привода масляных насосов как по величине потребляемой мощности, так и по статическому характеру нагрузок от насосов незначительно.

3. Разработанная динамическая модель привода бермовых фрез и отрезных коронок проходческого комбайна с соосными роторами позволяет формировать математическую модель в виде систем компонентных и топологических уравнений.

Список использованных источников

1. Горные машины: учебное пособие: в 2 ч. / под ред. В.Я. Прушака. – Минск: Вышэйшая школа, 2018. – Ч. 2: Машины и комплексы для добычи полезных ископаемых / Г.В. Казаченко, В.Я. Прушак, Г.А. Басалай. – 2018. – 228 с.

2. Устройство и эксплуатация проходческого комбайна ПКС-8М / В.А. Данилов [и др.]; под ред. В.Я. Прушака. – Минск: Тэхналогія, 2010. – 175 с.

3. Казаченко, Г.В. Горные машины. Практикум: учебное пособие / Г.В. Казаченко, Г.А. Басалай, Г.И. Лютко. – Минск: Вышэйшая школа, 2020. – 200 с.

4. Басалай, Г.А. Анализ работы ковшового погрузочного устройства проходческого комбайна / Г.А. Басалай // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. тр. XVI МНТК «Чтения памяти Р.В. Кубачека», проведенной в рамках Уральской промышленной декады, Екатеринбург, 12-13 апреля 2018 г. / Уральский государственный горный университет; под общ. ред. Ю.А. Лагуновой. – Екатеринбург, 2018. – С. 20-23.

5. Басалай, Г.А. Динамические модели приводов соосных роторов проходческих комбайнов типа ПКС-8 и КРП-3 / Г.А. Басалай // Горная механика и машиностроение. – 2021. – № 2. – С. 84-88.

6. Басалай, Г.А. Динамическая модель одно моторного привода соосных роторов проходческого комбайна / Г.А. Басалай // Горная механика и машиностроение. – 2021. – № 3. – С. 75-79.

7. Тарасик, В.П. Математическое моделирование технических систем: учебник / В.П. Тарасик. – Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2016. – 592 с.

Информация об авторе

Григорий Антонович Басалай – старший преподаватель кафедры «Горные машины», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь), e-mail: rbasalai@bntu.by.

Information about the author

Ryhor Antonavich Basalai – Senior Lecturer of the “Mining machinery” Department, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Belarus), e-mail: rbasalai@bntu.by.

Поступила в редакцию 22.11.2021 г.

УДК 621.313.04-233.2:620.19

В.Б. Попов, М.Н. Погуляев, Л.В. Веппер, В.В. Логвин*УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого»,
г. Гомель, Беларусь***ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ПОДШИПНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
МАШИН С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ**

Аннотация. *Статья посвящена вибродиагностике технического состояния подшипников качения электрических машин на ОАО «БМЗ». Представлены и проанализированы спектры сигналов вибраций, характерные для различных дефектов подшипников. Установлено, что только 9 % подшипников выходят из строя вследствие естественного износа. В остальных случаях выход из строя обусловлен неправильным применением или эксплуатацией подшипников.*

Ключевые слова: *вибродиагностика, вибрация, спектр сигнала, дефект, подшипник качения.*

V.B. Popov, M.N. Pogulyaev, L.V. Vepper, V.V. Logvin*Sukhoi State Technical University of Gomel, Belarus***DETECTION OF DEFECTS OF ELECTRIC BEARINGS MACHINES
USING MODERN CONTROL METHODS**

Abstract. *The article is devoted to vibration diagnostics of the technical condition of rolling bearings of electrical machines at OJSC "BSW". Spectra of vibration signals typical for various bearing defects are presented and analyzed. It has been found that only 9 % of bearings fail due to natural wear. Otherwise, the failure is due to improper use or operation of the bearings.*

Keywords: *vibration diagnostics, vibration, signal spectrum, defect, bearing.*

Введение. Эффективность и конкурентоспособность современного предприятия в значительной степени зависят от надежности эксплуатируемого данным предприятием оборудования. Поэтому встает главный вопрос о возможности контроля технического состояния, продления межремонтного периода и повышения надежности технологического оборудования. Согласно принятой стратегии ремонтов на ОАО «БМЗ» (ОАО «Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания») диагностика оборудования является важнейшим фактором снижения простоев, связанных с поломками оборудования.

Внедрение средств технической диагностики позволяет отказаться от обслуживания и ремонта по регламенту и перейти к прогрессивному принципу обслуживания и ремонта по фактическому состоянию, что дает значительный экономический эффект [1].

Измерение вибрации стало основой контроля технического состояния оборудования. Для этого вначале использовались механические виброметры, измеряющие амплитудное значение виброперемещения, в дальнейшем большее значение получил контроль виброскорости на базе электронных приборов.

В состав агрегатов, задействованных в технологическом процессе, входит большое количество узлов роторного типа. Одним из основных этапов технической диагностики является определение дефектов механизма, которые представляют собой наибольшую опасность для его функционирования. Вибродиагностика является эффектив-

ным способом неразрушающего контроля технического состояния узлов роторного типа, позволяет выявить явно выраженные (дисбаланс, расцентровку, недостаточную жесткость опор), зарождающиеся дефекты подшипниковых узлов, дефекты электромагнитной системы электрической машины и другие.

Цель статьи – изучение дефектов подшипников, возникающих в электрических машинах, при помощи измерения вибрации на ОАО «БМЗ».

Основная часть. Спектр и форма сигнала вибрации содержат информацию о характерных дефектах подшипников качения. В этой информации содержатся специфические особенности в зависимости от вида дефекта. Одна из таких характерных особенностей – наличие несинхронных пиков, т.е. пиков, не являющихся кратными гармониками частоты вращения вала электрической машины. Спектр вибрации может содержать как дискретные пики, так и широкополосные частотные области высокого уровня. Во временном сигнале вибрации могут наблюдаться ударные импульсы, обусловленные перекатыванием элементов качения через дефекты дорожек или контактом дорожек с дефектными участками элементов качения.

Важным моментом является то, что колебания, связанные с дефектом подшипника качения, имеют меньшую амплитуду, чем колебания, связанные со многими другими повреждениями, такими, как дисбаланс, несоосность или дефекты зубчатой передачи.

Во временном сигнале вибрации и его спектре присутствуют характерные признаки дефектов подшипников качения, которые сильно зависят от вида дефекта. Один из таких признаков – присутствие в спектре несинхронных пиков, т.е. пиков, которые не являются целочисленными гармониками частоты вращения. Более того, при развитых дефектах можно наблюдать гармоники этих несинхронных пиков. Спектр может содержать как узкополосные пики, так и размытые «в виде холмов», в которых сосредоточена вибрационная энергия (рисунок 1).

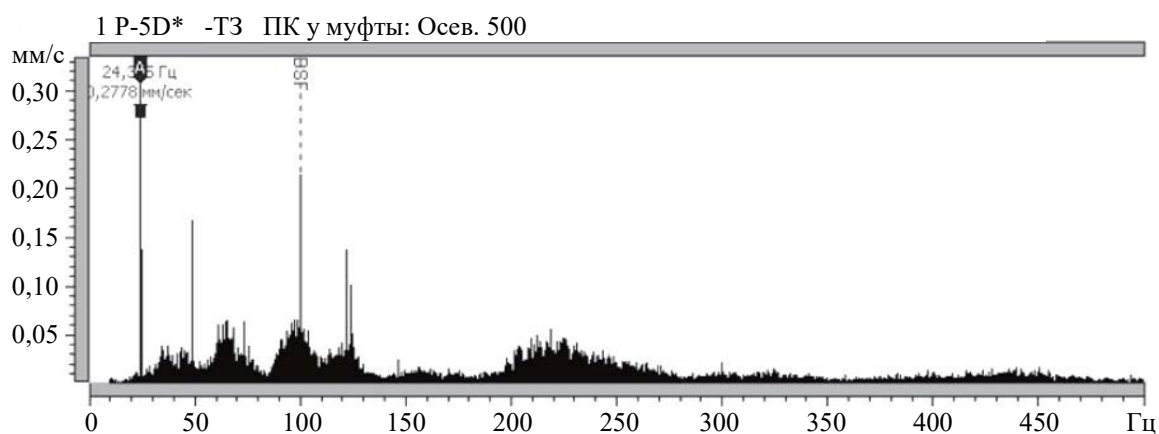


Рисунок 1. – Выкрашивание тел качения в подшипнике электрического двигателя

Из колебательных сил электромагнитного происхождения в электрических машинах следует выделить:

- магнитные силы, определяемые изменениями магнитной энергии в определенном ограниченном пространстве, как правило, в ограниченном по протяженности участка воздушного зазора;
- электродинамические силы, определяемые взаимодействием магнитного поля с электрическим током;
- магнитострикционные силы, определяемые эффектом магнитострикции, т.е. изменением линейных размеров магнитного материала под действием магнитного поля.

В электрических машинах переменного тока возможно возникновение специфических вибраций двух типов. Во-первых, это электромагнитные вибрации ферромагнитных сердечников и стальных конструктивных элементов электротехнического оборудования, по которым во время работы оборудования протекает переменный магнитный поток. Эти вибрации возникают за счет специфического процесса, который в литературе называется магнитострикцией. Этот эффект обусловлен тем, что при перемагничивании ферромагнитных материалов сердечника происходит изменение внутренней ориентации элементарных намагниченных частиц, доменов. При каждом перемагничивании сердечника происходит поворот доменов на 180 градусов, что в итоге и приводит к небольшому «линейному расширению» ферромагнитного материала. Поскольку перемагничивание сердечника магнитным потоком происходит дважды за один период питающей сети, то и частота вибрации, обусловленная эффектом магнитострикции, равна удвоенной частоте питающей сети, т.е. она равна 100 Гц. Вне зависимости от оборотной частоты вращения ротора электрической машины, частота вибрации сердечника (пакета стали статора) всегда равна 100 Гц.

Если оборотная частота ротора равна 50 Гц, то гармоника электромагнитной вибрации располагается на спектре в том месте, где может находиться вторая гармоника оборотной частоты. Если же оборотная частота ротора равна, например, 25 Гц, то гармоника электромагнитной вибрации на спектре будет располагаться на месте четвертой гармоники оборотной частоты.

Во-вторых, вибрации в электрической машине вызываются специфическими электродинамическими силами, которые в литературе принято называть «амперовыми силами», т.к. их величина определяется по закону Ампера. Самое важное для нас в этом законе заключается в том, что в числителе стоит произведение токов в проводниках, т.е. квадрат тока промышленной частоты. Из тригонометрии следует, что квадрат синусоидального сигнала есть другой гармонический сигнал, но имеющий удвоенную частоту. Получаем, что сила электродинамического воздействия между двумя проводниками с синусоидальными токами промышленной частоты имеет удвоенную частоту, относительно частоты питающей сети.

Таким образом, вибрации электрической машины, не вызванные механическими проблемами, имеют удвоенную частоту относительно частоты питающей сети, т.е. равную 100 Гц. Это определение относится как к электромагнитным причинам повышенной вибрации, возникающим в сердечниках электрических машин силами магнитострикции, так и к электродинамическим силам взаимодействия проводников друг с другом, возникающим при протекании токов по обмоткам электрической машины.

Подшипники качения имеют свои характерные частоты проявления дефектов, которые определяются их геометрическими размерами. Эти частоты можно рассчитать для внутренней и внешней дорожек сепаратора, шариковых или роликовых элементов.

Для расчета характерных частот необходимо знать число элементов качения, их диаметр, диаметр сепаратора и угол контакта. Если эти параметры известны, можно определить все характерные частоты, генерируемые каждым отдельным элементом подшипника.

В отличие от повреждений других видов характерные подшипниковые частоты будут появляться в спектре только в том случае, если есть дефекты конкретных элементов подшипников качения. Очень часто в спектре возможно появление сразу нескольких частотных составляющих, характерных для данного конкретного подшипника качения. Например, если на внешней дорожке присутствует какой-нибудь дефект, через некоторое время этот дефект вызовет износ элементов качения, а затем передастся и внутренней дорожке подшипника.

Дефекты подшипников, которые можно распознать с помощью вибрационного анализа, включают в себя дефекты внутренней и внешней дорожек качения, дефекты элементов качения, дефекты сепаратора, ослабление посадки подшипника, увеличенный внутренний зазор, проворачивание внутреннего кольца на валу, прекос подшипника и дефекты смазки.

Для оценки длительности службы подшипника становится актуальным вопрос о месте повреждения и степени его развития. Здесь важно знать – это внутренняя дорожка или внешняя, поскольку подшипник с дефектом на внешней дорожке может прослужить дольше, чем с дефектом на внутренней. Именно появление частотной составляющей, характерной для дефекта внутренней дорожки, требует особого внимания (рисунки 2, 3).

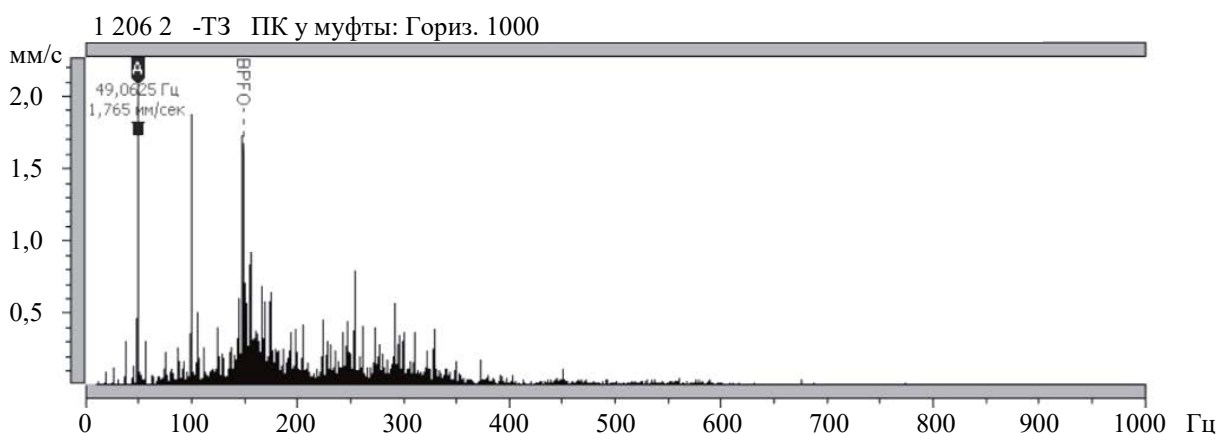


Рисунок 2. – Трещина на наружном кольце подшипника

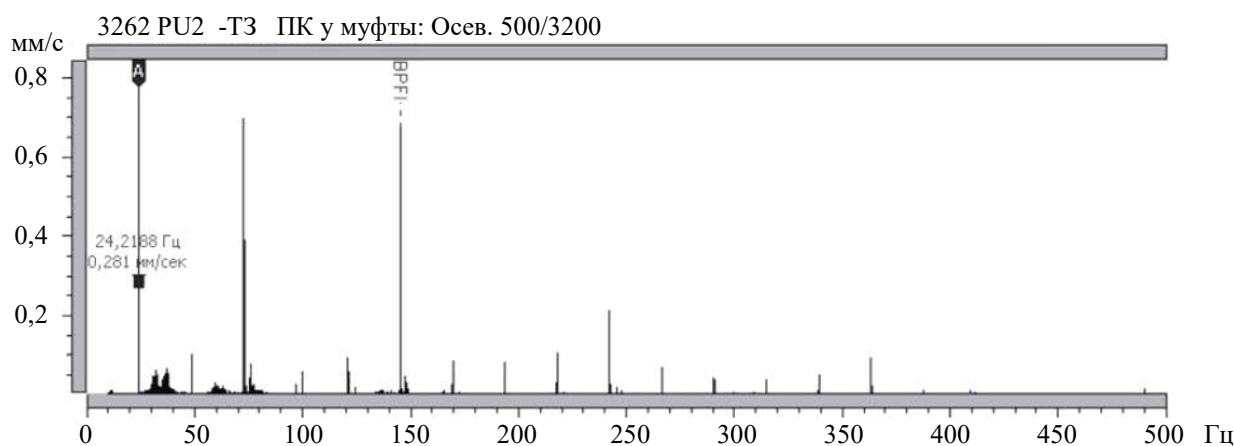


Рисунок 3. – Износ внутренней дорожки подшипника

В большинстве случаев способ использования подшипников таков, что внутренняя дорожка вращается, а внешняя остается неподвижной. Если дефект находится на внутренней дорожке, он постоянно перемещается вместе с ней и поэтому не всегда находится в зоне нагрузки, а временами – далеко уходит от места расположения датчика вибрации. Энергия вибрации передается от внутренней дорожки к датчику через элементы качения, сепаратор, внешнюю дорожку и корпус подшипника качения. Этот путь распространения вибрации гораздо хуже с точки зрения потерь энергии. Дефект также перемещается и часто находится вне зоны нагрузки, где удары значительно ослабевают. К тому же необходимо быть уверенным, что выборки сигналов, по которым

производится усреднение, длинные и охватывают, как минимум, один полный оборот вала электрической машины. В ином случае, может оказаться так, что в выборки не будут попадать самые мощные участки сигнала, когда дефект внутренней дорожки проходит зону нагрузки [2].

Если в спектре вибрации видны характерные частоты как для внутренней, так и для внешней дорожки, и обе они имеют одинаковую амплитуду (рисунок 4), то можно утверждать, что внутренняя дорожка имеет более развитый дефект. А если имеются дефекты на обеих дорожках, то можно предположить, что дефекты имеются также и на элементах качения. Они могут не всегда проявляться на соответствующих частотах, но могут вызвать появление боковых полос у частот, характерных для дефектов дорожек. Если все указывает на повреждение нескольких элементов подшипника качения, это должно рассматриваться как экстренный случай, поскольку дефекты элементов качения легко могут вызвать повреждения сепаратора, что приведет к полному разрушению подшипника, а вследствие – и к полному выходу из строя самой электрической машины.

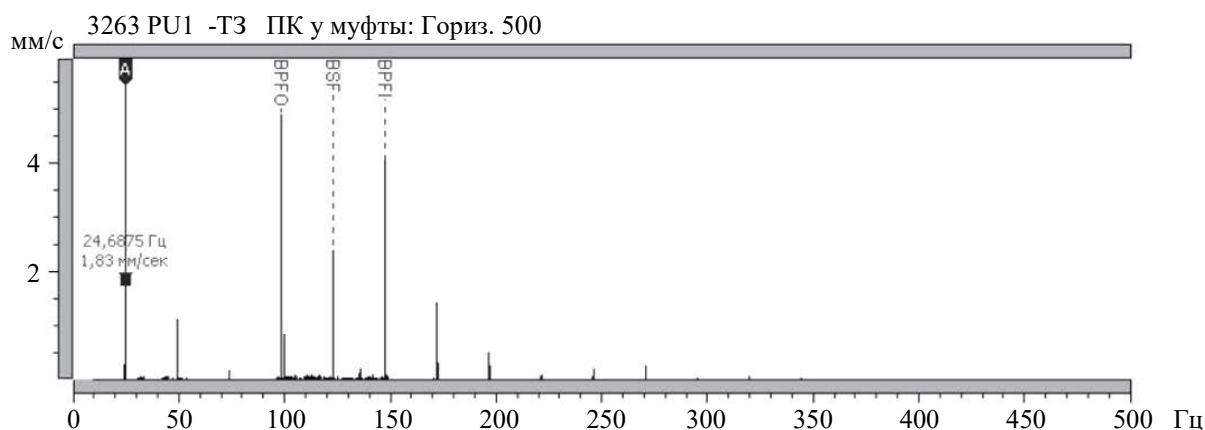


Рисунок 4. – Износ подшипника электрического двигателя

Часто возникает вопрос: что является причиной повреждений? Повышенная вибрация, изменение внутреннего зазора или отсутствие смазки? Если имеет место повышенная вибрация, определяемая действием каких-либо иных источников, можно попытаться уменьшить дисбаланс и перекосы в машине, прежде чем подшипник попадет в зону ускоренного разрушения. Особенно это касается перекосов. Если это отсутствие смазки, оно должно сопровождаться очень быстрыми изменениями в сигнале вибрации, повышенным нагревом подшипника и угрозой скорого выхода подшипника из строя.

Еще один вид дефектов связан с сепаратором (рисунок 5). Дефекты сепаратора проявляются на частоте вращения сепаратора (FTF) и сопровождаются, как правило, другими повреждениями в подшипнике. Эта составляющая единственная из всех подшипниковых составляющих, которая является субгармоникой, так как ее частота ниже частоты вращения вала электрической машины. Эту составляющую очень трудно обнаружить в спектре вибрации, поскольку в тот момент, когда она появляется, подшипник находится уже в очень плохом состоянии. Часто его работа при этом будет сопровождаться акустическим шумом, и до разрушения подшипника останется очень немного времени.

Появление в спектре первой гармоники оборотной частоты или боковых модуляционных полос, или даже значительного широкополосного шума свидетельствует о прогрессирующем дефекте, который приведет к изменению геометрии подшипника.

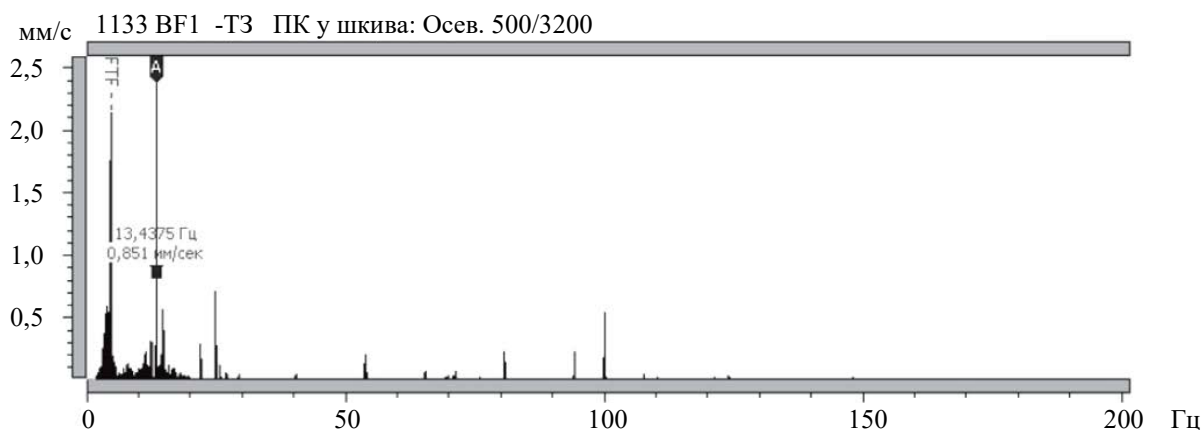


Рисунок 5. – Износ сепаратора подшипника SKF 6306

Многочисленные гармоники частоты вращения (например, от 1-й до 8-й) в спектре вибрации предполагают ослабление в соединениях и могут указывать на наличие увеличенных внутренних зазоров. Там, где ожидается увеличенный зазор, будет присутствовать большее число гармоник с большими амплитудами. Через некоторое время в спектре может появиться половинная гармоника и ее гармоники (т.е. составляющие на частотах 0,5; 1,5; 2,5; 3,5 и т.д. от оборотной) [3].

Если в спектре присутствует 3-я гармоника оборотной частоты, или же она заметно выделяется на фоне остальных гармоник, это может свидетельствовать о том, что подшипник проворачивается на валу (рисунок 6). Если же имеет место неплотная посадка корпуса подшипника, то в спектре вибрации следует ожидать появления нескольких гармоник частоты вращения вала, обычно доминирующими будут 1-я и 4-я гармоники.

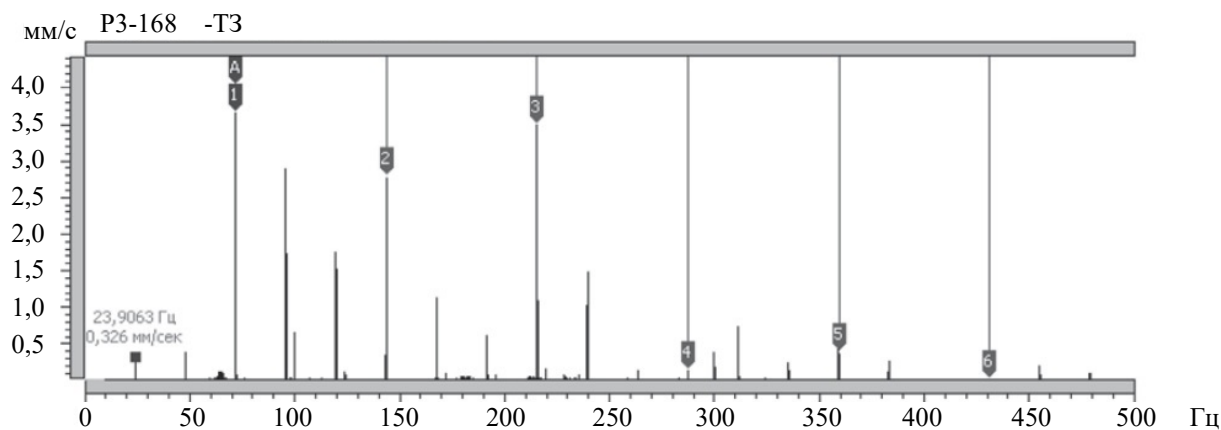


Рисунок 6. – Проворачивание подшипника качения 305 на валу электрического двигателя

Если же в подшипнике имеет место перекося, его также можно распознать с помощью анализа вибрации. В этом случае следует обратить внимание на частоту, равную частоте вращения вала, умноженную на число тел качения в подшипнике.

Заключение. Анализ статистики вибродиагностических работ на предприятии показал, что примерно 42 % подшипников электрических машин выходят из строя вследствие избытка или недостатка смазки; 26 % связаны с неправильной установкой подшипника, например, когда подшипник пытаются поставить на место с помощью ударного инструмента или наклейки и сварки; 23 % включают неправильное применение подшипников, дефекты сборки и повышенную вибрацию; только 9 % подшипников

выходят из строя вследствие естественного износа. Своевременное выявление дефектов подшипников позволило избежать значительных затрат, связанных с ремонтом и эксплуатацией электрических машин. Таким образом, вибродиагностика является важнейшей частью профилактического техобслуживания, позволяющей продлить срок службы оборудования, сократить расходы на его ремонт и эксплуатацию.

Список использованных источников

1. Баркова, Н.А. Введение в виброакустическую диагностику роторных машин и оборудования / Н.А. Баркова. – СПб.: Изд. центр СПбМТУ, 2006. – 160 с.
2. Гольдин, А.С. Вибрация роторных машин / А.С. Гольдин. – М.: Машиностроение, 1999. – 344 с.
3. Биргер, И.А. Техническая диагностика / И.А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.

Информация об авторах

Виктор Борисович Попов – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Сельскохозяйственные машины», УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого» (пр. Октября, 48, 246029, г. Гомель, Беларусь), e-mail: popow@gstu.by.

Михаил Никифорович Погуляев – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизированный электропривод», УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого» (пр. Октября, 48, 246029, г. Гомель, Беларусь), e-mail: poguljaev@gstu.by.

Леонид Владимирович Веппер – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизированный электропривод», УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого» (пр. Октября, 48, 246029, Гомель, Беларусь), e-mail: vepper@gstu.by.

Владимир Васильевич Логвин – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизированный электропривод», УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого» (пр. Октября, 48, 246029, г. Гомель, Беларусь), e-mail: logvin@gstu.by.

Information about the authors

Viktor Borisovich Popov – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Agricultural Machines, Sukhoi State Technical University of Gomel (48, Oktyabrya Ave., 246029, Gomel, Belarus), e-mail: popow@gstu.by.

Mikhail Nikiforovich Pogulyaev – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of the Automated Electric Drive Department, Sukhoi State Technical University of Gomel (48, Oktyabrya Ave., 246029, Gomel, Belarus), e-mail: poguljaev@gstu.by.

Leonid Vladimirovich Vepper – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of the Automated Electric Drive Department, Sukhoi State Technical University of Gomel (48, Oktyabrya Ave., 246029, Gomel, Belarus), e-mail: vepper@gstu.by.

Vladimir Vasilievich Logvin – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of the Automated Electric Drive Department, Sukhoi State Technical University of Gomel (48, Oktyabrya Ave., 246029, Gomel, Belarus), e-mail: logvin@gstu.by.

Поступила в редакцию 22.10.2021 г.

УДК 621.95.01

О.Н. Кляус, А.А. Жолобов*МОУВО «Белорусско-Российский университет», г. Могилев, Беларусь***ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ОСЕЙ ОТВЕРСТИЙ
ПРИ ИХ РАССВЕРЛИВАНИИ И ЗЕНКЕРОВАНИИ**

Аннотация. В статье представлена теоретическая база для определения смещения оси отверстия, полученного при рассверливании и зенкерования, предварительно просверленного в сплошном металле. Основой теоретической базы является представление суммарного отклонения расположения поверхности на предшествующем переходе как интегрального выражения, зависящего от глубины резания, которое позволяет оценить неравномерность распределения радиальных составляющих силы резания, действующих на режущих кромках инструмента и определяющих упругое смещение инструмента, учитывающегося при определении смещения оси отверстия.

Ключевые слова: смещение оси отверстия, смещение инструмента, ось отверстия, сверление, зенкерование.

O.N. Klyaus, A.A. Zholobov*Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus***THEORETICAL JUSTIFICATION OF THE DIRECTION OF THE AXES
OF THE HOLES DURING THEIR REAMING AND COUNTERSINKING**

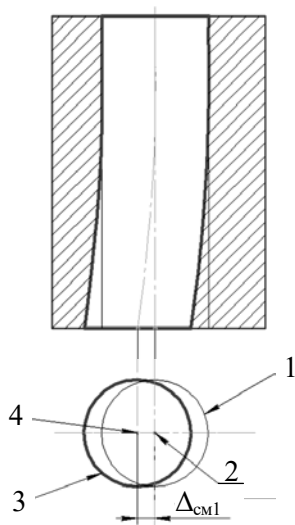
Abstract. The article presents a theoretical basis for determining the displacement of the axis of the hole, obtained during reaming and countersinking, pre-drilled in solid metal. The basis of the theoretical base is the representation of the total deviation of the surface location at the previous transition as an integral expression depending on the cutting depth, which allows us to estimate the unevenness of the distribution of radial compounding cutting forces acting on the cutting edges of the tool and determining the elastic displacement of the tool, which is taken into account when determining the displacement of the axis of the hole.

Keywords: the displacement of the holes axis, offset of the holes axis, tool offset, holes axis, drilling, countersinking.

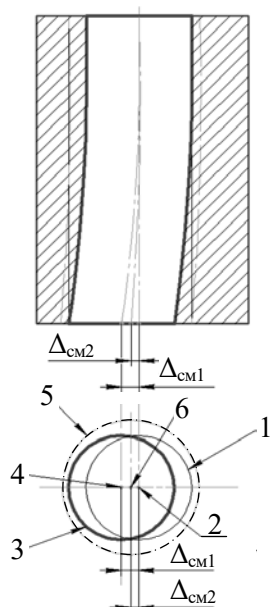
Введение. В процессе сверления отверстий в сплошном металле имеет место смещение осей этих отверстий от прямой линии, возникающее в результате влияния следующих факторов: диаметрального зазора между сменной втулкой и сверлом; вылета сверла за нижний торец втулки; длины сменной кондукторной втулки; зазора между сменной и постоянной втулками; несоосности наружной и внутренней поверхностей сменной втулки; допуска на размер отверстия сменной втулки; допуска на размер направляющей части сверла; допуска на величину обратной конусности; подачи сверла; главных углов в плане φ_1 и φ_2 .

Полученные смещения осей отверстий после их предварительного формирования оказывают влияние на упругие смещения осей последующих инструментов при рассверливании и (или) зенкерования.

Настоящая работа нацелена на создание теоретической базы для прогнозирования погрешностей, связанных с упругим смещением осей инструментов (сверл и зенкеров) участвующих в технологической цепочке формирования отверстий. Предполагается, что полученная база может быть использована для разработки программных средств, при помощи которых возможно на этапе проектирования технологического процесса формирования отверстий определять их точностные параметры.



1 – окружность в начале обработки;
2 – теоретическая ось;
3 – окружность, полученная в результате упругого смещения оси сверла; 4 – ось после сверления
Рисунок 1. – Смещение оси отверстия после сверления в сплошном металле $\Delta_{см1}$



1 – окружность в начале обработки;
2 – теоретическая ось;
3 – окружность после сверления;
4 – ось после сверления;
5 – окружность после рассверливания (зенкерования); 6 – ось после рассверливания (зенкерования)
Рисунок 3. – Смещение осей отверстий: $\Delta_{см1}$ – после сверления; $\Delta_{см2}$ – после рассверливания

Теоретическое обоснование направления оси отверстия при его рассверливании. После сверления ось отверстия имеет некоторую величину отклонения от теоретической оси $\Delta_{см1}$, представленную на рисунке 1.

Поверхность полученного в результате обработки отверстия служит направляющей базой для инструмента в процессе рассверливания. При рассверливании инструмент находится под влиянием радиальных составляющих силы резания P_{y1} , P_{y2} (рисунок 2), действующих на каждой режущей кромке сверла.

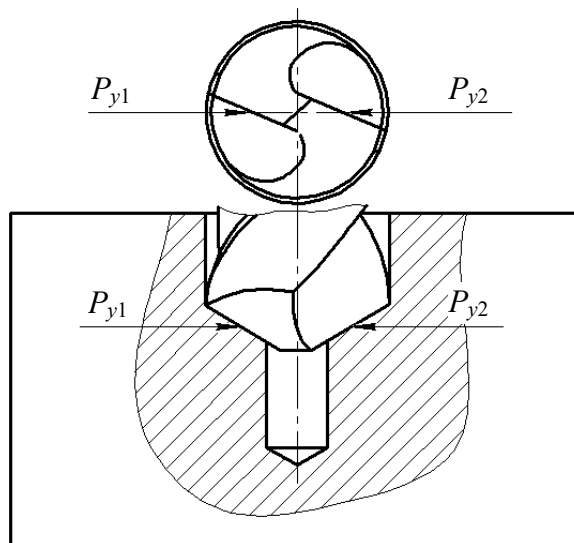


Рисунок 2 – Радиальные составляющие силы резания P_{y1} , P_{y2}

Указанные силы не являются уравновешивающими друг друга, поскольку глубина резания t для каждой из них имеет разное значение в связи со смещением оси отверстия при сверлении. Поперечное сечение инструмента для рассверливания имеет большую площадь собственного сечения и, в связи этим, жесткость его будет больше, чем при сверлении, а смещение оси отверстия меньше (рисунок 3).

Величина смещения оси отверстия от теоретической прямой линии после рассверливания (зенкерования) $\Delta_{см2}$ определяется по формуле (1):

$$\Delta_{см2} = \Delta_{Г} + \Delta_{у} + \Delta_{уК}, \quad (1)$$

где $\Delta_{Г}$ – геометрическое смещение оси инструмента;
 $\Delta_{у}$ – упругое смещение оси инструмента;

$\Delta_{уК}$ – упругое смещение узла направления (кондукторной плиты) [1].

Геометрическое смещение оси инструмента обусловлено конструктивными параметрами инструмента.

Величина упругого отжатия $\Delta_{ук}$ узла направления инструмента (кондукторной плиты) зависит от его жесткости и жесткости инструментальной наладки. Она может быть выражена в зависимости от величины упругого отжатия $\Delta_{у.и.}$ инструмента с помощью коэффициента n_3 .

Смещение оси отверстия, обусловленное упругим смещением оси инструмента Δ_y , находится по формулам (2)-(4) [2]:

$$\Delta_y = n_3 \cdot \Delta_{у.и.}; \quad (2)$$

$$\Delta_{у.и.} = \frac{n_2 \cdot \Delta P_k \cdot l_1^3}{3 \cdot E \cdot c \cdot D^4}; \quad (3)$$

$$\Delta P_k = 0,25 \cdot k \cdot \Delta Z \cdot C_R; \quad (4)$$

$$C_R = \left(\left(C_1 \cdot t^{x_1} \cdot s^{y_1} \cdot HB^{n_1} \right)^2 - \left(C_2 \cdot t^{x_2} \cdot s^{y_2} \cdot HB^{n_2} \right)^2 \right)^{0,5}, \quad (5)$$

где n_3 – коэффициент, зависящий от жесткости инструментальной наладки;

n_2 – коэффициент, учитывающий влияние силы осевой подачи сверла P_o и неуравновешенной осевой силы резания ΔP_k ;

l_1 – длина инструмента, необходимая для обработки отверстия, мм;

E – модуль упругости первого рода, Н/мм²;

c – коэффициент, учитывающий тип инструмента;

D – диаметр сверла, мм;

ΔP_k – равнодействующая неуравновешенных сил, Н;

k – число режущих кромок инструмента;

ΔZ – величина неравномерности припуска на обработку, мм;

C_R – коэффициент, учитывающий режимы обработки и материал обрабатываемой заготовки, Н/мм;

HB – твердость обрабатываемого материала, $HB = 197$;

$C_1, C_2, x_1, x_2, y_1, y_2, n_1, n_2$ – эмпирические коэффициенты и показатели степени;

t – глубина резания, мм;

s – подача, мм/об.

Длина инструмента, необходимая для обработки отверстия $l_1 \geq l$, где l – длина обрабатываемого отверстия, мм.

Согласно [3] максимальные припуски на диаметр принимают в качестве глубины резания и используют для определения режимов резания:

$$t = 2 \cdot Z_{i\max} = 2 \cdot Z_{i\min} + Td_{i-1} + Td_i, \quad (6)$$

где Td_{i-1} – допуск размера на предшествующем переходе;

Td_i – допуск размера на выполняемом переходе;

$2 \cdot Z_{i\min}$ – минимальный припуск при обработке внутренних поверхностей на диаметр:

$$2 \cdot Z_{i\min} = 2 \left[(R_z + h)_{i-1} + \sqrt{\Delta_{\Sigma i-1}^2 + \varepsilon_i^2} \right], \quad (7)$$

где R_z – высота неровностей профиля на предшествующем переходе, мм;

h_{i-1} – глубина дефектного поверхностного слоя на предшествующем переходе, мм;

$\Delta_{\Sigma i-1}$ – суммарные отклонения расположения оси отверстия после сверления, мм;

ε_i – погрешность установки заготовки на выполняемом переходе, мм.

Соответственно припуск на одну сторону:

$$Z_{i\min} = (R_z + h)_{i-1} + \sqrt{\Delta_{\Sigma i-1}^2 + \varepsilon_i^2}. \quad (8)$$

Тогда глубина резания на одну сторону:

$$t = Z_{i\max} = Z_{i\min} + Td_{i-1} + Td_i, \quad (9)$$

Суммарные отклонения расположения оси отверстия после сверления:

$$\Delta_{\Sigma i-1} = \sqrt{(\Delta y_1 \cdot l)^2 + C_0^2}, \quad (10)$$

где Δy_1 – увод оси отверстия на 1 мм длины отверстия, мм;

C_0 – смещение оси отверстия относительно номинального положения, мм.

В соответствии с рисунком 3, после сверления отверстия в процессе рассверливания величина суммарных отклонений расположения оси отверстия на каждом бесконечно малом участке длины будет изменяться:

$$\Delta_{\Sigma}^2 = \int_0^l \left((\Delta y_1 \cdot l)^2 + C_0^2 \right) dl. \quad (11)$$

Тогда при интегрировании зависимости (11) и подстановке ее в формулы (8), (9) получаются формулы (12) и (13):

$$Z_{i\min} = (R_z + h)_{i-1} + \sqrt{\frac{\Delta y_1^2 \cdot l^3}{3} + C_0^2 \cdot l + \varepsilon_i^2}, \quad (12)$$

$$t = (R_z + h)_{i-1} + \sqrt{\frac{\Delta y_1^2 \cdot l^3}{3} + C_0^2 \cdot l + \varepsilon_i^2} + Td_{i-1} + Td_i. \quad (13)$$

Припуск при рассверливании, как и при зенкерования, должен быть не более $(D - d)/2$ на одну сторону, где D – диаметр отверстия после рассверливания, d – диаметр отверстия после сверления.

Величину неравномерности глубины резания при обработке, необходимую при расчете равнодействующей неуравновешенных сил ΔP_y , находят исходя из того, что величина глубины резания будет изменяться и в поперечном сечении:

$$\Delta Z = \int_0^t t dt. \quad (14)$$

Все вышеприведенные зависимости учитываются в смещении оси отверстия, обусловленным упругим смещением оси инструмента Δy , выражены зависимостью (15):

$$\Delta y = 0,25 \cdot k \cdot \frac{\left(\left[(R_z + h)_{i-1} + \sqrt{\frac{\Delta y_1^2 \cdot l^3}{3} + C_0^2 \cdot l + \varepsilon_i^2} \right] + Td_{i-1} + Td_i \right)^2}{2} \times$$

$$\times \left[\left(C_1 \cdot \left(\left[(R_z + h)_{i-1} + \sqrt{\frac{\Delta y_1^2 \cdot l^3}{3} + C_0^2 \cdot l + \varepsilon_i^2} \right] + Td_{i-1} + Td_i \right)^{x_1} \cdot s^{y_1} HB^{n_1} \right)^2 - \right. \quad (15)$$

$$\left. - \left(C_2 \cdot \left(\left[(R_z + h)_{i-1} + \sqrt{\frac{\Delta y_1^2 \cdot l^3}{3} + C_0^2 \cdot l + \varepsilon_i^2} \right] + Td_{i-1} + Td_i \right)^{x_2} \cdot s^{y_2} HB^{n_2} \right)^2 \right]^{0,5} \cdot n_2 \cdot l_1^3 \div (3 \cdot E \cdot c \cdot D^4) \cdot n_3.$$

Таким образом, получена зависимость для определения упругого смещения оси инструмента при рассверливании отверстий после его предварительного сверления. Однако, следует отметить то, что сверла могут изготавливаться как цельными, так и сварными. Соответственно значение E – модуля упругости первого рода – для сварных сверл в зависимости (15) имеет величину, соответствующую материалу рабочей части.

Точность отверстия после зенкерования выше, чем после рассверливания [2], в связи с большим числом режущих кромок инструмента и более уравновешенным действием сил на них. Поэтому зенкерование, в соответствии с требованиями к точности получаемого отверстия, установленными исходя из служебного назначения детали, конструкторской документации и технологии изготовления, выполняется или после сверления, или после рассверливания и имеет свои особенности, связанные в том числе с типом зенкера и предназначением самих процессов. Так, рассверливание предназначено для увеличения диаметра отверстия, а зенкерование может использоваться как для увеличения диаметра отверстия (тогда процесс осуществляется с большими припусками на обработку), так и для повышения точности отверстия, когда обработка происходит с малыми припусками.

Особенности направления осей отверстий при их зенкеровании после сверления и рассверливания. Зенкеры по типу крепления бывают хвостовые и насадные. С рабочей частью, изготовленной из быстрорежущей стали или из твердого сплава. Хвостовые зенкеры устанавливаются путем закрепления хвостовика в патроне станка, насадные зенкеры устанавливаются на оправку, которая закрепляется в шпинделе станка. Конструкции бывают цельные, сборные или сварные. В данной работе не рассматриваются отдельно насадные зенкеры, поскольку допускается их приравнивание при точно выполненных сопрягаемых поверхностях с натягом к цельным конструкциям.

Упругое смещение цельного хвостового зенкера и сварного хвостового зенкера рассчитывается аналогично цельному или сварному сверлу при рассверливании (рисунок 3), но необходимо учесть, что в формуле (4) число зубьев $k = 3 \dots 6$; Δy_1 – увод оси отверстия на 1 мм длины отверстия после сверления; Δy_2 – увод оси отверстия на 1 мм длины отверстия после рассверливания (из формулы (10)). Аналогичные Δy_1 и Δy_2 применяются при расчетах упругого смещения как сварного зенкера с приваренным хвостовиком, так и зенкера, оснащенного твердосплавными пластинами.

При зенкеровании отверстий инструментом с рабочей частью, изготовленной из твердого сплава или рабочей частью, оснащенной твердосплавными пластинами, необходимо учесть значение модулей упругости разных материалов, которые имеют разную величину. Например, для твердого сплава ВК8 режущей части $E = 5,9 \cdot 10^5$ МПа [3], для быстрорежущей стали $E = 2,83 \cdot 10^5$ МПа [3], для стали 45 – $E = 2 \cdot 10^5$ МПа [4]. Таким образом, упругое смещение оси инструмента, оснащенного твердосплавными пластинами, при зенкеровании рассчитывают по формуле:

$$\Delta_y = n_3 \cdot \frac{n_2 \cdot \Delta P_k}{3 \cdot c \cdot D_{\text{хв}}^4} \cdot \left[\frac{l_2^3}{E_1} + \frac{l_3^3}{E_2} \right], \quad (16)$$

где l_2 – длина рабочей части хвостового зенкера, не оснащенного твердосплавными пластинами мм;

l_3 – длина рабочей части зенкера, оснащенного твердосплавными пластинами, мм;

E_1, E_2 – модули упругости материалов режущей части хвостового зенкера, не оснащенного твердосплавными пластинами и оснащенного, соответственно, МПа;

$D_{\text{хв}}$ – диаметр хвостового зенкера, мм.

Далее в примерах, сведенных в таблицу, рассмотрены упругие смещения оси цельного инструмента и инструмента со вставными твердосплавными пластинами. Упругие смещения оси сварного инструмента рассчитываются по формулам, аналогичным формулам для расчета упругих смещений оси цельного инструмента.

Примеры. Согласно [1, 5, 6], исходные данные имеют следующие величины.

Для операции сверления: $n_3 = 1,2$; $n_2 = 1,4$; $k = 2$; $\varphi_1 = 67,4^\circ$ и $\varphi_2 = 67,6^\circ$. Для инструмента из быстрорежущей стали: $C_1 = 200$; $C_2 = 125$; $x_1 = 1,0$; $x_2 = 0,9$; $s = 0,25$ мм/об; $y_1 = 0,75$; $y_2 = 0,75$; $HB = 197$; $n_1 = 0$; $n_2 = 0$; $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; $c = 0,011$. Для инструмента из твердого сплава: $C_1 = 300$; $C_2 = 243$; $x_1 = 1,0$; $x_2 = 0,9$; $s = 0,24$ мм/об; $y_1 = 0,75$; $y_2 = 0,6$; $HB = 197$; $n_1 = -0,15$; $n_2 = -0,3$; $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; $c = 0,023$. Для операции зенкерования после сверления: $k = 3$; $c = 0,018$.

Таблица. – Упругое смещение оси инструмента при сверлении Δ_{yc} , рассверливании $\Delta_{ур}$, зенкерования цельным хвостовым зенкером $\Delta_{уцз}$ и зенкерования инструментом с рабочей частью, оснащенной твердосплавными пластинами $\Delta_{утз}$

Показатель	Значение										
диаметр отверстия при сверлении d , мм	30	28	26	24	22	20	18	16	14	12	10
длина инструмента l_1 , мм (ГОСТ 2092-77)	275	265	255	245	235	220	205	195	185	180	160
l_1/d	9,2	9,5	9,8	10,2	10,7	11,0	11,4	12,2	13,2	15,0	16,0
длина обрабатываемого отверстия l , мм	150										
l/d	5,0	5,4	5,8	6,3	6,8	7,5	8,3	9,4	10,7	12,5	15,0
Δ_{yc} , мм	1,025	1,091	1,165	1,25	1,349	1,464	1,601	1,766	1,968	2,22	2,539
$R_{z(i-1)}$, мм	0,04										
h_{i-1} , мм	0,06										
Td_{i-1}	0,18										
Td_i	0,11										
Δ_{y1} , мм	0,0013										
C_0 , мм	0,02										
диаметр отверстия при рассверливании D , мм	35	33	31	29	27	25	23	21	19	17	15
l/D	4,3	4,5	4,8	5,2	5,6	6,0	6,5	7,1	7,9	8,8	10,0
$\Delta_{ур}$, мм	0,046	0,058	0,075	0,097	0,13	0,176	0,246	0,354	0,528	0,824	1,36
диаметр отверстия при зенкерования D_1 , мм	38	36	34	32	30	28	26	24	22	20	18
l/D_1	3,9	4,2	4,4	4,7	5,0	5,4	5,8	6,3	6,8	7,5	8,3
$\Delta_{уцз}$, мм	0,031	0,039	0,049	0,062	0,081	0,106	0,143	0,197	0,279	0,408	0,622
$\Delta_{утз}$, мм	0,024	0,030	0,037	0,047	0,061	0,081	0,109	0,150	0,212	0,311	0,473

Из таблицы видно, что при рассверливании упругое смещение инструмента меньше, чем при сверлении, а при зенкерования – меньше, чем при рассверливании, при зенкерования инструментом, оснащенным твердосплавными пластинами – меньше, чем при зенкерования инструментом из быстрорежущей стали.

Выводы.

1. Выведены зависимости, позволяющие рассчитывать возможное смещение оси инструмента при рассверливании и зенкерования после сверления, а также при зенкерования после рассверливания. Правильность полученных формул подтверждена расчетами в представленном примере.

2. В предложенных зависимостях учитывается неравномерное распределение глубины резания при рассверливании и (или) зенкерования вследствие смещения оси отверстия от теоретической прямой линии при сверлении и зенкерования. Их суть заключается в представлении суммарного отклонения расположения поверхности на предшествующем переходе как интегрального выражения, зависящего от глубины резания. Зависимости позволяют оценить неравномерность распределения радиальных составляющих силы резания, действующих на режущих кромках инструмента, определяющих упругое смещение инструмента, учитывающееся при определении смещения оси отверстия.

3. В связи с тем, что жесткость инструмента оказывает влияние на точность положения оси отверстия в процессе обработки, необходимо разработать программу, учитывающую деформации осевого инструмента еще на стадии проектирования операций формирования отверстий на этапе технологической подготовки производства.

Список использованных источников

1. Косилова, А.Г. Точность обработки, заготовки и припуски в машиностроении. Справочник технолога / А.Г. Косилова, Р.К. Мещеряков, М.А. Калинин. – М.: Машиностроение, 1976. – 288 с.
2. Дальский, А.М. Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т. / А.М. Дальский; под ред. А.М. Дальского [и др.]. – 5-е изд. – М.: Машиностроение-1, 2003 – Т. 1. – 911 с.
3. Жолобов, А.А. Прогнозирование и обеспечение качества технологических систем на этапах их проектирования и изготовления / А.А. Жолобов. – Могилев: БРУ, 2005. – 303 с.
4. Миронова, М.Н. Функциональные семантические сети для обеспечения точности механической обработки: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / М.Н. Миронова. – Могилев, 2015. – 300 л.
5. Дальский, А.М. Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т. / А.М. Дальский; под ред. А.М. Дальского [и др.]. – 5-е изд. – М.: Машиностроение-1, 2003 – Т. 2. – 946 с.
6. Зенкеры цельные. Конструкция и размеры: ГОСТ 12489-71. – Введ. 01.07.72. – М.: Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР, 1996.

Информация об авторах

Ольга Николаевна Кляус – аспирант, МОУВО «Белорусско-Российский университет» (пр. Мира, 43, 212005, г. Могилев, Беларусь), e-mail: bru@bru.by.

Александр Алексеевич Жолобов – кандидат технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения», МОУВО «Белорусско-Российский университет» (пр. Мира, 43, 212005, г. Могилев, Беларусь), e-mail: bru@bru.by.

Information about the authors

Olga Nikolaevna Klyaus – Ph. D. student, Belarusian-Russian University (43, Mira Ave., 212005, Mogilev, Belarus), e-mail: bru@bru.by.

Aliaksandr Alekseyevich Zholobov – Ph. D. (Engineering), Professor of the Department “Technology of machine-building”, Belarusian-Russian University (43, Mira Ave., 212005, Mogilev, Belarus), e-mail: bru@bru.by.

Поступила в редакцию 22.10.2021 г.

УДК 658.012.011.56

В.Б. Попов¹, И.А. Баран²

¹УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого»,
г. Гомель, Беларусь

²Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш», г. Гомель, Беларусь

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В СИСТЕМЕ ОЧИСТКИ САМОХОДНОГО ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

Аннотация. В статье рассматривается влияние различных параметров на формирование технологического потока в системе очистки. Предлагается выполнять подбор оптимальных параметров системы очистки путем компьютерного моделирования процесса очистки на основе экспериментальных данных и численного моделирования аэродинамики технологического тракта. Представлена методика создания расчетных конечно-элементных сеток и компьютерного моделирования аэродинамических потоков в системе очистки зерноуборочного комбайна. Сформировано формализованное описание k - ε -модели турбулентности, используемой в расчете сплошной среды. Все это позволило создать зерноуборочный комбайн с принципиально новой компоновкой технологического тракта, имеющего лучшие показатели производительности и энергоемкости.

Ключевые слова: зерноуборочный комбайн, система очистки, воздушный поток, аэродинамика, кинетическая энергия, двухфазный поток, компьютерное моделирование, метод конечных элементов.

V.B. Popov¹, I.A. Baran²

¹Sukhoi State Technical University of Gomel, Belarus

²Scientific and Technical Center for Combine Harvesting of OJSC "Gomselmash", Gomel, Belarus

COMPUTER SIMULATION OF THE AERODYNAMIC PROCESS IN THE CLEANING SYSTEM OF A SELF-PROPELLED GRAIN HARVESTER

Abstract. The article examines the influence of various parameters on the formation of a process flow in the cleaning system. It is proposed to select the optimal parameters of the cleaning system by computer modeling of the cleaning process based on experimental data and numerical modeling of the aerodynamics of the technological path. The technique of creating computational FE grids and computer modeling of aerodynamic flows in the cleaning system of a combine harvester is presented. A formalized description of the k - ε -model of turbulence used in the calculation of a continuous medium has been formed. All this made it possible to create a combine harvester with a fundamentally new layout of the technological path, which has the best performance and energy intensity.

Keywords: combine harvester, cleaning system, air flow, aerodynamics, kinetic energy, two-phase flow, computer simulation, finite element method.

Введение. Конкурентоспособность мобильной сельскохозяйственной техники (рисунок 1), разрабатываемой в режиме автоматизированного проектирования, сегодня обеспечивают наукоемкие САЕ-технологии инженерного анализа сложных технических объектов [1].

Объектом исследования, описываемым в данной статье, является система очистки зерноуборочного комбайна (СОЗК). В научной литературе достаточно публикаций,

посвященных функциональному моделированию и проектированию ее основного компонента – механизма очистки (МО) [2-4].



Рисунок 1. – Самоходный зерноуборочный комбайн КЗС-3219

Главная задача при назначении параметров МО состоит в повышении его уравновешенности, что практически не влияет на рост производительности СОЗК. Повышение пропускной способности технологического тракта зерноуборочного комбайна связано, в том числе, с аэродинамическим анализом процесса отделения легковесных частиц из поступающего в СОЗК зернового вороха.

Цель работы – обоснование и выбор формализованного описания аэродинамики в СОЗК, обеспечивающего лучшие показатели производительности и энергоемкости технологического тракта.

1. Определение влияния различных параметров на формирование технологического потока.

Основные аэродинамические процессы в технологическом тракте зерноуборочного комбайна происходят в СОЗК. Очистка предназначена для выделения зерна из вороха, поступающего из-под молотильного устройства 1 и соломотряса 6. Основными узлами СОЗК являются: колеблющиеся на подвесках решетные станы 7 и 9, вентилятор 23, зерновой 22 и колосовой 20 шнеки (рисунок 2).

Качество выделения зерна из вороха, при прочих равных условиях, зависит от воздушного потока вентилятора, размеров отверстий решет 14, 15, 18 и их кинематики.

Разделение вороха в СОЗК на зерно и незерновые примеси производится в основном по весу и парусности частиц. В зерноуборочных комбайнах применяют регулируемые жалюзийные решета для настраивания размеров отверстий. Зерновой ворох, прошедший через отверстия удлинителя 16 верхнего решета, и сходы с решета поступают в колосовой шнек 20, откуда в зависимости от содержания недомолоченного колоса направляются в молотильный аппарат 1 или на соломотряс 6.

Зерновой ворох подается в СОЗК стрясной доской 2, снабженной пальцевой решеткой, которая располагается над передней частью верхнего решета. Она предназначена для отвода крупных солоmistых примесей к середине решета, чем создаются благоприятные условия для просеивания основной части зерна.

Зерновой материал после выделения его из вороха представляет в большинстве случаев смесь, состоящую из семян основной культуры, семян посторонних растений и из примеси разнородного сора минерального и органического происхождения [5].

Усовершенствования в данной области можно разделить на несколько групп: использование нетрадиционных схем очистки, изменение конструкций решетных станков, применение различных конструкций вентиляторов, рационально формирующих воздушный поток.

Многочисленные исследования показали, что при изменении схемы традиционной СОЗК и при ее стабильной работе во всем диапазоне агротехнических показателей зернового вороха для разных культур прирост производительности был незначительным.

Таким образом, основной путь увеличения производительности зерноуборочного комбайна – подбор оптимальных параметров СОЗК путем компьютерного моделирования процесса очистки на основе экспериментальных данных и численного моделирования аэродинамики технологического тракта.

2. Методика создания расчетных конечно-элементных сеток и компьютерного моделирования аэродинамических потоков в СОЗК.

Целью исследования двухфазного потока «воздух – зерновая масса» в СОЗК является выбор конструктивных параметров кожуха вентилятора, дефлекторов, разделяющих и перенаправляющих воздушный поток, решет и степени их закрытия. Конструктивные параметры СОЗК выбирают таким образом, чтобы ее производительность была максимальной, а очистка была оптимальной при минимальных энергетических затратах и минимальных потерях зерна.

Для расчета использовалась система вычислительной аэрогидродинамики с использованием метода конечных элементов (МКЭ) для численного решения уравнений Навье-Стокса, описывающих движение текучей среды. Геометрическая модель и конечно-элементная (КЭ) 2D-сетка проточных областей СОЗК представлены на рисунке 3.

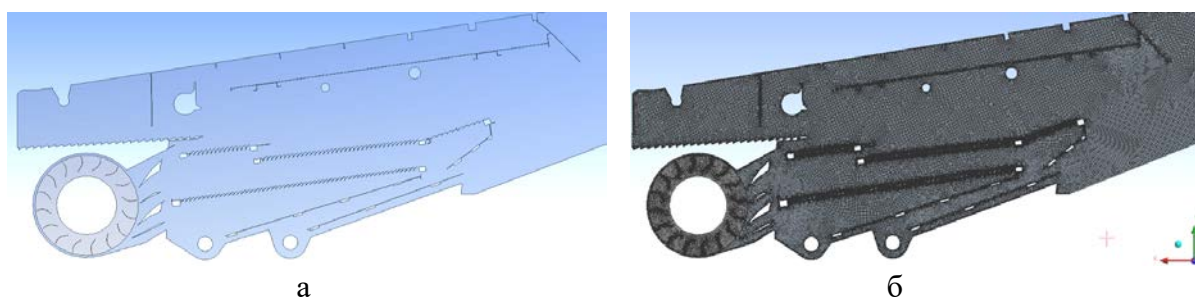


Рисунок 3. – Геометрическая модель (а) и конечно-элементная 2D-сетка (б) проточной области системы очистки зерноуборочного комбайна

В качестве исходных данных для проведения численного моделирования в проточной части вентилятора задавалась скорость вращения вентилятора очистки. На границе выхода из СОЗК было задано относительное давление $p = 0$ Па. В качестве модели турбулентности была принята стандартная для таких случаев k - ϵ -модель [6].

3. k - ϵ -модель турбулентности, используемая в расчете сплошной среды.

k - ϵ -модель относится к классу дифференциальных моделей турбулентности с двумя уравнениями. В ней строятся два дополнительных дифференциальных уравнения переноса для осредненных пульсационных характеристик, через которые затем выражается коэффициент турбулентной вязкости μ_t .

Для определения турбулентной вязкости в этой модели рассматриваются два скалярных параметра: удельная кинетическая энергия турбулентности k :

$$k = \frac{1}{2} \overline{v' \cdot v'}, \quad (1)$$

и скорость вязкой диссипации энергии турбулентности ε :

$$\varepsilon = 2\nu tr \left(\overline{\text{grad} \vec{v}' \cdot (\text{grad} \vec{v}')^T} \right), \quad (2)$$

где ν – пульсация скорости, черта сверху обозначает осреднение Рейнольдса;

t – время динамической релаксации с учетом отклонения от закона обтекания Стокса;

r – расстояние между точками в периоде осреднения;

T – период осреднения.

Уравнение для кинетической энергии турбулентности можно найти с помощью некоторых преобразований, с учетом (1) получим:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \text{grad} k \cdot \vec{v}' = \overline{\vec{v}' \cdot \vec{v}'} \cdot \text{grad} \overline{\vec{v}'} + \text{div} \left(\nu \cdot \text{grad} k - \overline{\vec{v}' \left(\frac{p'}{p} + \frac{1}{2} \vec{v}' \cdot \vec{v}' \right)} \right) - 2\nu tr \left(\overline{\text{grad} \vec{v}' \cdot (\text{grad} \vec{v}')^T} \right), \quad (3)$$

где div (дивергенция) – это линейный дифференциальный оператор на векторном поле, характеризующий поток данного поля через поверхность достаточно малой (в условиях конкретной задачи) окрестности каждой внутренней точки области определения поля.

По форме это уравнение является стандартным уравнением переноса. Рассмотрим физический смысл слагаемых, входящих в уравнение (3):

- левая часть описывает конвективный перенос вещества (здесь это энергия турбулентности);
- в правой части первый член описывает генерацию турбулентности;
- второй член – диффузионный перенос кинетической энергии турбулентности двух видов: молекулярный (первое слагаемое в скобках), турбулентный (второе слагаемое);
- третий член описывает диссипацию кинетической энергии турбулентности.

Первый из членов в правой части (3) содержит тензор турбулентных напряжений, который, по гипотезе Буссинеска, выражается через осредненные характеристики потока. Последний член представляет собой не что иное, как скорость вязкой диссипации энергии турбулентности (2).

Таким образом, неопределенным остается только член, отвечающий за турбулентную диффузию, и для замыкания уравнения (3) необходимо записать его через осредненные характеристики. Для этого используется гипотеза градиентной диффузии, согласно которой турбулентный диффузионный перенос кинетической энергии турбулентности выражается по аналогии с молекулярным переносом через ее градиент:

$$\overline{\vec{v}' \left(\frac{p'}{p} + \frac{1}{2} \vec{v}' \cdot \vec{v}' \right)} = \frac{1}{\sigma_k} \nu_t \text{grad} k, \quad (4)$$

где ν_t – кинематический коэффициент турбулентной вязкости,

σ_k – безразмерная эмпирическая константа.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \text{grad} k \cdot \vec{v}' = P_k + \text{div} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad} k \right) - \varepsilon, \quad (5)$$

где P_k – кинематическая плотность турбулентных напряжений:

$$P_k = -T_n \text{grad} \overline{\vec{v}'}. \quad (6)$$

При этом $T_n = T_t / p$ нормированный на плотность тензор турбулентных напряжений, также равный $T_{tr} = \overline{\vec{v}' \cdot \vec{v}'}$, что видно из (3) и (5). Тогда:

$$T_n = \frac{T_t}{p} = \frac{2\mu_t D - \frac{2}{3} p k I}{p} = 2\nu_t D - \frac{2}{3} k I, \text{ с учетом } \nu_t = \frac{\mu_t}{p},$$

где I – пространственный масштаб турбулентности (также называемый интегральным масштабом) характеризует крупные (энергонесущие) вихри;

D – тензор турбулентной диффузии частиц.

$$\text{С учетом } D = \frac{1}{2} \left(\text{grad} \vec{v} + \left(\text{grad} \vec{v} \right)^T \right):$$

$$T_{tr} = T_n = \nu_t \left(\text{grad} \vec{v}' + \left(\text{grad} \vec{v}' \right)^T \right) - \frac{2}{3} k I. \quad (7)$$

Для связи кинематического коэффициента турбулентной вязкости с осредненными параметрами модели используется соотношение, выражающее гипотезу Колмогорова-Прандтля:

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (8)$$

где C_μ – безразмерная эмпирическая константа.

Уравнения для скорости вязкой диссипации энергии турбулентности ε можно получить двумя способами:

1) вывести при помощи процедуры осреднения по Рейнольдсу аналогично тому, как описано выше для удельной кинетической энергии турбулентности k . Это уравнение будет содержать различные корреляции, которые невозможно определить через осредненные параметры потока. Естественно, в этом случае потребуются некоторые дополнительные предположения для моделирования членов полученного уравнения;

2) записать стандартную форму уравнения переноса для ε и предположить, что генерация и диссипация ε пропорциональны аналогичным величинам для k (входящим в уравнение (3)) с эмпирическими коэффициентами пропорциональности.

Так или иначе, оба пути приводят к уравнению, вид которого подобен виду аналогичного уравнения для k (5) с двумя эмпирическими константами C_1 и C_2 :

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \text{grad} \varepsilon \cdot \vec{v}' = C_1 \frac{\varepsilon}{k} + \text{div} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \text{grad} \varepsilon \right) - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (9)$$

где σ_ε – стандартная константа k - ε -модели турбулентности.

Уравнения (5)-(9), которые надо решать совместно с осредненным по Рейнольдсу уравнением Навье-Стокса, составляют так называемую стандартную (высокорейнольдсовую) модель турбулентности Сполдинга-Лаундера. На основе калибровки констант для этой модели, выполненной по экспериментальным данным для струйных течений, приняты следующие их значения:

$$\sigma_k = 1; \quad C_\mu = 0,09; \quad \sigma_\varepsilon = 1,3; \quad C_1 = 1,44; \quad C_2 = 1,92. \quad (10)$$

Стандартная модель (как и другие высокорейнольдсовые модели) дает хорошие результаты для струйных и других свободных течений, однако плохо работает вблизи стенок, поскольку здесь локальное турбулентное число Рейнольдса Re_t мало.

Для расчета пристенных течений используются либо низкорейнольдсовые модели, либо версии k - ε -моделей, в которые введены пристенные функции, т.е. в этих моделях в уравнения вводятся дополнительные функции, отвечающие за влияние стенок на турбулентность. В общем случае большинство низкорейнольдсовых k - ε -моделей могут быть записаны следующим образом:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \text{grad} k \cdot \vec{v}' = P_k + \text{div} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \text{grad} k \right) - \varepsilon - f_k; \quad (11)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \text{grad} \varepsilon \cdot \vec{v}' = C_1 \frac{\varepsilon}{k} + \text{div} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \text{grad} \varepsilon \right) - C_2 f_2 \frac{\varepsilon^2}{k} - f_\varepsilon; \quad (12)$$

$$v_t = C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (13)$$

Здесь введены четыре пристенные функции $-f_k$, f_2 , f_ε и f_μ , зависящие от k и ε . В популярной низкорейнольдсовой модели функции задаются в форме:

$$f_\mu = e^{-\frac{3,4}{(1+0,02 \text{Re}_t)^2}}; \quad (14)$$

$$f_2 = 1 - 0,3e^{-\text{Re}_t^2}. \quad (15)$$

Отметим, что локальное турбулентное число Рейнольдса также можно определить через величины k и ε :

$$\text{Re}_t = \frac{k^2}{v\varepsilon}. \quad (16)$$

К достоинствам k - ε -моделей относится высокая точность при расчете свободных сдвиговых течений. Они достаточно универсальны и не требуют задания каких-либо дополнительных параметров. Тем не менее, трудности, связанные с их применением в пристенных областях, заставляют исследователей изобретать все новые и новые модели. Однако до настоящего времени никаких предпочтений среди моделей, базирующихся на концепции осреднения по Рейнольдсу, по существу, не наблюдается, поскольку не существует «универсальной» модели турбулентности.

Заключение. Использование возможностей программного комплекса ANSYS Fluent при моделировании аэродинамических потоков позволяет получить реальное представление о физических процессах, происходящих внутри исследуемой области, что в свою очередь дает возможность улучшить конструкции проточных частей СОЗК (рисунок 4).

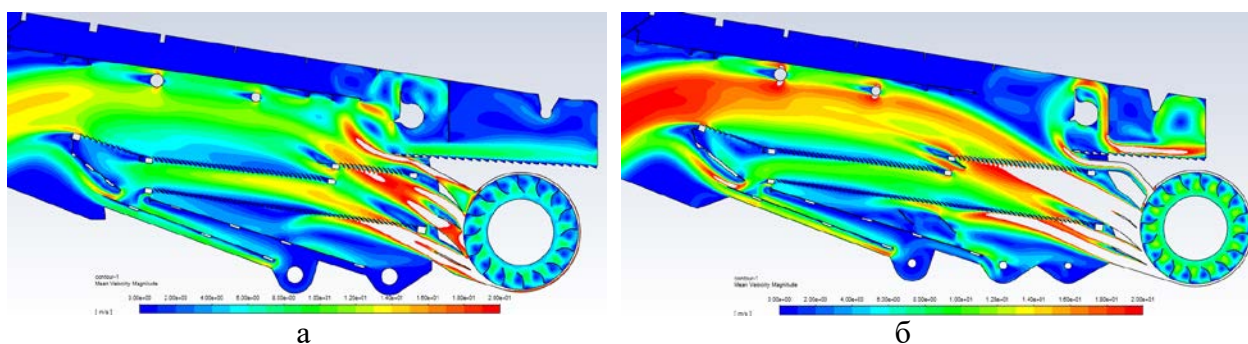


Рисунок 4. – Поля скоростей аэродинамических потоков системы очистки зерноуборочного комбайна в базовой (а) и модернизированной (б) конструкции

Внедрение в НТЦК ОАО «Гомсельмаш» методики компьютерного моделирования и нелинейного анализа взаимодействия воздушных потоков с зерновым ворохом в СОЗК позволило создать зерноуборочный комбайн с принципиально новой компоновкой технологического тракта, имеющего лучшие показатели производительности и

энергоемкости (на 20-30 %) по сравнению с аналогичными показателями комбайнов с классической компоновкой технологического тракта [3].

Список использованных источников

1. Численное моделирование на основе программного пакета STAR-CD аэродинамических потоков с целью выявления ударных волн в турбокомпрессоре / А.М. Крот [и др.] // Авиадвигатели XXI века: II междунар. науч.-техн. конф., Москва, 6-9 дек. 2005 г. / ЦИАМ. – Москва, 2005. – Т. 1. – С. 3.
2. Бойко, Л.И. Динамическое взаимодействие колеблющегося органа машины с источником энергии ограниченной мощности / Л.И. Бойко // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1998. – № 3. – С. 28-36.
3. Попов, В.Б. Алгоритм параметрического анализа механизма двухстанной очистки зерноуборочного комбайна / В.Б. Попов, А.В. Голопятин, А.А. Новиков // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2018. – № 2. – С. 27-33.
4. Попов, В.Б. К вопросу о параметрической оптимизации механизма очистки зерноуборочного комбайна / В.Б. Попов // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра: сб. тезисов докл. 2-ой междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 4-5 окт. 2018 г. – Гомель, 2018. – С. 50-52.
5. Баран, И.А. Использование компьютерного моделирования аэродинамических потоков при проектировании систем очистки зерноуборочных комбайнов / И.А. Баран, А.Н. Вырский, С.В. Труханович // Молодежь в науке – 2014: приложение к журналу «Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі»: материалы Междунар. науч. конф. молодых ученых, Минск, 18-21 нояб. 2014 г.: в 5 ч. – Минск, 2015. – Ч. 3. – С. 56-61.
6. Баран, И.А. Исследование распределения воздушных потоков в системе очистки зерноуборочного комбайна КЗС-1319 в зависимости от геометрических параметров проточных областей / И.А. Баран, С.В. Труханович // Вестник аграрной науки Дона. – 2019. – № 1 (45). – С. 29-38.

Информация об авторах

Виктор Борисович Попов – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Сельскохозяйственные машины», УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого» (пр. Октября, 48, 246029, г. Гомель, Беларусь), e-mail: popow@gstu.by.

Игорь Анатольевич Баран – магистр технических наук, ведущий инженер, руководитель сектора конструкторско-исследовательского отдела «Динамики, прочности и аналитической надежности», НТЦК ОАО «Гомсельмаш» (ул. Ефремова, 61, 246031, г. Гомель, Беларусь), e-mail: igo.baran@yandex.ru.

Information about the authors

Viktor Borisovich Popov – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Agricultural Machines, Sukhoi State Technical University of Gomel (48, Oktyabrya Ave., 246029, Gomel, Belarus), e-mail: popow@gstu.by.

Igor Anatolievich Baran – Master of Technical Sciences, Leading Engineer, Head of the Sector of the Design and Research Department “Dynamics, Strength and Analytical Reliability”, OJSC “Gomselmash” (61, Efremova Str, 246031, Gomel, Belarus), e-mail: igo.baran@yandex.ru.

Поступила в редакцию 15.11.2021 г.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 678.03:27

В.М. Шаповалов¹, К.В. Овчинников¹, С.Ф. Мельников¹,
А.В. Шаповалов¹, Р.С. Напреев²

¹ГНУ «Институт механики металлополимерных систем
им. В.А. Белого НАН Беларуси», г. Гомель, Беларусь

²ОДО «Полидрев», г. Гомель, Беларусь

**ВЛИЯНИЕ ОТХОДОВ ЛИСТОВОГО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНОГО
КОМПОЗИТА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТЕРМОПЛАСТОВ**

Аннотация. В статье проведен обзор материалов, используемых в производстве термопластичных древесно-полимерных композитов (ДПК) для различных отраслей промышленности. В лабораторных условиях установлены рецептурно-технологические параметры получения экспериментальных образцов ДПК на основе термопластов, наполненных отходами листового ДПК. Это позволит в условиях производства оптимизировать работу промышленной экструзионной линии для изготовления листовых и профильно-погонажных изделий с высокими физико-механическими показателями.

Ключевые слова: древесно-полимерные композиты, термопластичные связующие, отходы листового ДПК, экструзия.

V.M. Shapovalov¹, K.V. Ovchinnikov¹, S.F. Melnikov¹, A.V. Shapovalov¹, R.S. Napreev²

¹V.A. Belyi Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems
of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus

²ALC "Polydrev", Gomel, Belarus

**INFLUENCE OF SHEET WPC WASTE ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL
PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON THERMOPLASTICS**

Abstract. The article provides an overview of the materials used in the production of thermoplastic wood-polymer composites (WPC) for various industries. In laboratory conditions, prescription and technological parameters for obtaining experimental WPC samples based on thermoplastics filled with sheet WPC wastes have been established. This will allow in production conditions to optimize the operation of an industrial extrusion line for the manufacture of sheet and profile molded products with high physical and mechanical properties.

Keywords: wood-polymer composites, thermoplastic binders, sheet WPC waste, extrusion.

Введение. В настоящее время в зарубежных странах активно развивается промышленное производство термопластичных древесно-полимерных композитов (ДПК) для строительной отрасли, мебельного производства, автомобильной промышленности. Строительные материалы из ДПК, прежде всего – террасная доска (декинг) и огражденные системы, неуклонно вытесняют традиционный деревянный декинг и ограждения. Так, сегмент композитного декинга показывает ежегодные темпы роста производства ДПК более 20 % за последние 10 лет [1]. Одним из важных факторов успеха таких

конструкций из ДПК является их низкое водопоглощение, долговечность, стойкость к биологической деструкции, легкость установки, низкие (по сравнению с деревом) требования к техническому обслуживанию, приемлемая цена и доступность на зарубежном рынке. Еще одной важной областью применения таких материалов является производство листовых изделий, которые успешно используют при получении формованных деталей для автомобильной и тракторной промышленности. В ОДО «Полидрев» развивается направление, связанное с получением формованных деталей на основе ДПК для отделки кабин автотракторной техники. В то же время, в целом для Республики Беларусь характерно слабое развитие производства таких материалов. Это связано с использованием в композициях в основном первичных полимеров и дорогих модификаторов, а также необходимостью применения дорогостоящих импортных технологий и оборудования. Как следствие, изделия из ДПК имеют более высокую себестоимость, что сдерживает расширение выпуска номенклатуры такой продукции.

В ходе работы проведен обзор материалов, используемых в производстве термопластичных ДПК, и исследование влияния измельченных отходов вторичного листового ДПК (ВДПК) на физико-механические свойства ДПК на основе полиолефинов и сополимера акрилонитрила, бутадиена и стирола (АБС) для определения возможности их применения при экструзии листовых и профильно-погонажных изделий технического и бытового назначения.

Обзор материалов для ДПК. В современном производстве ДПК могут использоваться почти все термопластичные полимеры и их смеси, однако на практике из-за невысокой термостойкости древесного наполнителя в основном используют термопласты, переработка которых возможна при температурах не превышающих 200 °С. Наиболее распространенными термопластами для полимерной матрицы выступают полиолефины – полиэтилен и полипропилен. Так, на американском рынке производителей ДПК около 90 % объема используемых термопластов составляет полиэтилен, а полипропилен (ПП) и поливинилхлорид (ПВХ) – оставшиеся 10 %. Из них регенерированные полимеры составляют около 35-40 % общего потребления полимеров, первичные полимеры – 60-65 % [2]. Некоторые производители ДПК проводят эксперименты по использованию в производстве полиэтилентерефталата, полиамида, полистирола и других термопластов в первичных формах и в виде отходов. Но данные полимеры редко используются в составах ДПК в промышленных масштабах из-за высоких температур переработки, сложных технологических режимов формирования изделий и более высокой ценой по сравнению с полиолефинами и ПВХ [3].

В качестве наполнителя в производстве ДПК используется древесная крошка, мука или спрессованные из них гранулы, опилки, древесное волокно, стружка, древесно-растительные отходы сельскохозяйственного производства – кора, пробка, солома, шелуха злаковых, волокна конопли, льна и другие лигноцеллюлозные материалы, измельченные отходы производства целлюлозы, картона, бумаги и т.д. Нередко в композициях ДПК для повышения прочностных характеристик изделия используются смеси вышеперечисленных материалов. Так, например, сочетание дисперсного древесного и растительного волокнистого наполнителей позволяет обеспечить повышенную прочность при ударе и растяжении, а также высокую деформируемость материала при формовке, что важно для получения тонкостенных объемных изделий.

Для получения составов с заданными свойствами в композиции вводят различные модификаторы: адгезивы, противоударные модификаторы, температурные стабилизаторы, антиокислители, антимикробные средства, поверхностно-активные вещества, красители, огнезащитные средства, светостабилизаторы, вспенивающие агенты и т.д.

Свойства получаемых композитов главным образом определяются характером связей и взаимодействий между полимерной матрицей и наполнителем. Количество древесного наполнителя в композите может составлять от 40 до 80 мас. %. Основной технологической проблемой в производстве таких высоконаполненных композитов является совмещение гидрофильной основы древесного наполнителя с гидрофобной полимерной матрицей. Кроме того, увеличение содержания древесно-растительного наполнителя в диапазоне 60-80 мас. % без введения модифицирующих добавок может вести к быстрораствующей потере прочностных свойств изделия.

Улучшение совместимости компонентов и повышение механических свойств ДПК возможно путем модифицирования ДПК за счет введения в их состав аппретирующих веществ, минеральных наполнителей, лубрикантов – технологических добавок (внешних и внутренних смазок), улучшающих реологию расплава.

Аппретирующие вещества (аппреты) – так называемые «сшивающие» агенты, которые регулируют межфазные взаимодействия между разнородными по природе материалами и позволяют увеличить межфазную адгезию между термопластичным связующим и древесным наполнителем. Наиболее широко в качестве аппретов используют малеинизированные полиолефины. Они представляют собой химически модифицированные полимеры (сополимеры), содержащие химически активные группы и обычно получаемые посредством прививки полярного мономера (малеинового ангидрида) на полимерную основу (полиолефин) методом реакционной экструзии. Из аппретов, используемых в композициях ДПК, можно также выделить органосиланы, хлорированные парафины, модифицированный акрилом политетрафторэтилен и другие совместители, приводящие к лучшему диспергированию древесного наполнителя в полимерной матрице.

Минеральные наполнители могут использоваться для улучшения механических свойств ДПК (твердость, прочность и модуль упругости при изгибе), однако их применение ограничено вследствие их высокой стоимости и абразивного износа перерабатывающего оборудования. Наиболее широко в композициях ДПК используется карбонат кальция, тальк, слюда, каолиновая глина, технический углерод (сажа), борат цинка, волластонит, стекловолокно и др.

Необходимость применения лубрикантов при экструзии композиций ДПК объясняется повышенной вязкостью расплава ДПК, высоким коэффициентом трения древесных наполнителей и более высоким давлением, при котором обычно осуществляется экструзия высоконаполненных композитов. В качестве смазок при экструзии ДПК могут использоваться силиконы, воски, мыла, акрилаты, высокомолекулярные жирные кислоты и спирты, сложные эфиры, амиды и соли жирных кислот и другие смазочные материалы. Наиболее широко в композициях ДПК применяются стандартные смазки, используемые при экструзии наполненных термопластов, такие как стеараты цинка, кальция и других металлов, амидный воск, окисленный полиэтиленовый воск, парафиновые воски. Использование лубрикантов обеспечивает улучшенную водостойкость ДПК, значительно улучшает реологию расплава, повышает производительность и уменьшает износ оборудования, но может несколько снизить прочностные показатели изделий из ДПК. Особенно негативное воздействие оказывают стеараты металлов на действие малеинизированных аппретов, что нивелирует увеличение прочности и жесткости, наблюдаемое при использовании этих «сшивающих» агентов.

Нередко для улучшения совместимости компонентов используют физические смеси различных термопластичных и природных полимеров. Компонентами ДПК могут быть полисахариды, крахмал и продукты его модифицирования, сополимеры сложных эфиров с ненасыщенными карбоновыми кислотами, поликапролактон, сополимер этилена с винилацетатом (СЭВА), а также поливиниловый спирт (ПВС) как компатибилизи-

рующий агент, способный образовывать водородные связи с химическими группами древесных частиц и хорошо совмещаемый с полиолефинами. Известно также применение сополимеров винилового спирта с этиленом (СЭВС), которые могут быть получены гидролизом сэвиленов, причем композиты получают экструзией и литьем под давлением из смесей СЭВС и глицерина с банановой мукой [4]. Использование СЭВС эффективнее СЭВА в виду улучшения адгезии полиолефиновой матрицы к древесным частицам.

Анализируя научно-техническую информацию [5-15], а также рыночную стоимость изделий из ДПК, можно отметить, что, не смотря на высокое процентное содержание древесины в композициях, данная продукция имеет высокую себестоимость. В первую очередь это связано с использованием в основном первичных полимеров и дорогих модификаторов. Многие модификаторы (комплексные соединения металлов, металлоорганические соединения, сополимеры с привитыми функциональными группами и т.п.) зачастую токсичны и отрицательно влияют на экологичность готовых изделий. Химическое модифицирование полимерной матрицы, предварительная обработка древесного наполнителя также увеличивают себестоимость конечной продукции (стоимость аппретирующих веществ может составлять 60-80 % стоимости композиции) и значительно усложняют технологический процесс.

Исходя из вышеизложенного, для улучшения эксплуатационных характеристик изделий, уменьшения энергетических затрат на производство ДПК и снижения себестоимости продукции при разработке рецептурных составов в качестве наполнителя предложено использовать отходы производства ВДПК, образующиеся при производстве деталей потолка тракторов МТЗ. Объем образования данного отхода составляет около 40 тонн в год, поэтому его применение в составах ДПК представляется актуальным. Отходы представляют собой куски листового ДПК (рисунок 1) из полипропилена (50 мас. %) и древесной муки (45-48 мас. %) толщиной 3 мм, на который в процессе горячего прессования наносится подкладочная и лицевая ткани из полиэфирного холсто-прошивного полотна (2-4 мас. %).



Рисунок 1. – Отходы листового полипропилена: исходные и после отделения полиэфирной ткани и измельчения

Экспериментальная часть и обсуждение результатов. Выбор основного компонента составов ДПК – полимерной матрицы – проводили с учетом технологических режимов переработки и физико-механических свойств, а также стоимости сырья на рынке. Было предложено использовать следующие термопластичные связующие, перерабатываемые методом экструзии:

- первичный полипропилен марки РРН030GP (ТУ 2211-001-76332549-2012);
- первичный полиэтилен высокого давления (ПЭВД) марки 15803-020 (ГОСТ 16337-77);
- первичный полиэтилен низкого давления (ПЭНД) марки 273-79 (ГОСТ 16338-85);

- вторичный АБС марки 2806-31 (ТУ 2214-042-05762341-2014).

Хотя АБС-пластик не является распространенным термопластичным связующим для изделий из ДПК и почти не используется в этом качестве в промышленных масштабах, как например, полиолефины, но представляет для нас интерес вследствие значительного присутствия на рынке вторичных полимеров в виде отходов корпусной техники (компьютеров, телевизоров, холодильников и т.д.).

Технологический процесс подготовки наполнителя состоял из следующих операций:

- отделение полиэфирной ткани от листа и разрезание его на фрагменты;
- измельчение ВДПК с получением дробленного композита;
- фракционный отсев частиц композита;
- сушка композита.

Отделение полиэфирной ткани от полипропиленового листа производили вручную с использованием режущего инструмента. Полученные полипропиленовые листы с остатками полиэфирной ткани (не более 3-5 мас. %) разрезали на фрагменты и дробили на измельчителе XFS-230 со ступенчатой конфигурацией ножей, обеспечивающей высокую эффективность дробления материала. На выходе измельчителя, оснащенного калибровочной решеткой, получали дробленный композит с частицами не более 8 мм. Далее с помощью вибросита типа СВ-500 производили отсев частиц размером более 4 мм, а фракция меньше 4 мм являлась компонентом разрабатываемых композиций.

Удаление излишней влаги производили методом конвективной сушки. В качестве осушителя использовали горячий воздух, нагретый до температуры 80-90 °С и контактирующий с композитом в ходе своей циркуляции в рабочем объеме камеры лабораторного термостата. Сушку производили в навесках по 1 кг в течение 2-2,5 часов до получения материала с влажностью 1,5-2 %.

Компоненты композиций дозировали с использованием электронных весов в необходимых весовых соотношениях согласно предложенным рецептурам. Содержание отходов ДПК в композициях составляло от 50 до 80 мас. %. Смешение компонентов ДПК производили с использованием лопастного смесителя до получения однородного состава композиции. Предложенные рецептуры представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Рецептуры составов ДПК

№ состава	Содержание компонентов, мас. %				
	ПП	ПЭВД	ПЭНД	АБС	Отходы ДПК
1	20	-	-	-	80
2	30	-	-	-	70
3	40	-	-	-	60
4	50	-	-	-	50
5	-	20	-	-	80
6	-	30	-	-	70
7	-	40	-	-	60
8	-	50	-	-	50
9	-	-	20	-	80
10	-	-	30	-	70
11	-	-	40	-	60
12	-	-	50	-	50
13	-	-	-	20	80
14	-	-	-	30	70
15	-	-	-	40	60
16	-	-	-	50	50

Отработку технологических режимов экструзии составов ДПК проводили на одношнековом экструзиографе «RHEOCORD 90» (рисунок 2). Режимы экструзии ДПК приведены в таблице 2.



Рисунок 2. – Экструзиограф «RHEOCORD 90» компании «НААКЕ» (Германия)

Таблица 2. – Режимы экструзии ДПК

Наименование параметра	Диапазон значений
Температура в экструдере по зонам, °С	
1 зона	120 ± 5
2 зона	170 ± 5
3 зона	195 ± 5
Температура головки, °С	190 ± 5
Скорость вращения шнека, об/мин	85-90

В ходе экструзии установлено, что на одношнековом экструдере не удастся в полной мере достичь равномерного распределения наполнителя по объему и по поверхности образцов. Улучшение гомогенизации композиции в процессе экструзии возможно путем применения модифицирующих добавок, неоднократной (повторной) экструзии, а также при использовании в процессе переработки двухшнекового экструдера. В последнем случае экструдер может использоваться для эффективной реализации прямой экструзии, когда компоненты ДПК из соответствующего бункера подаются в рабочий цилиндр экструдера, где происходит их перемешивание, нагрев и выдавливание через фильеру.

Изготовление лабораторных образцов ДПК проводили с использованием двухшнекового экструдера «Suplast 25/2» (рисунок 3) на установленных технологических режимах в соответствии с ГОСТ на методы испытаний.

Шнеки экструдера имеют специальные смесительные участки, а также находятся между собой в зацеплении, что позволило достичь хорошего смешивания компонентов ДПК и получения однородной поверхности образцов. В качестве оснастки использовали плоскощелевую головку для получения ленты и формующую головку для получения полимерного профиля в виде прямоугольного бруска. Регулировку и стабилизацию толщины образцов проводили с помощью каландра.

Водопоглощение образцов определяли по ГОСТ 4650-80 «Пластмассы. Методы определения водопоглощения». Из листа, полученного на экструдере, вырезали образцы в форме квадрата толщиной 2 мм со стороной, равной 50 ± 1 мм. Образцы погружа-

ли в дистиллированную воду и выдерживали при 23 ± 2 °С в течение 24 часов. За результат измерений принимали среднее значение из пяти параллельных испытаний.



Рисунок 3. – Двухшнековый экструдер «Suplast 25/2»

Ударную вязкость по Шарпи определяли по ГОСТ 4647-80 «Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Шарпи». Для испытаний применяли стандартные образцы 3-го типа без надреза с размерами 50×6×4 мм. Испытания проводили на маятниковом копре при температуре 23 ± 2 °С и относительной влажности 50 ± 5 %. За результат измерений принимали среднее значение из десяти параллельных испытаний.

Прочность образцов при изгибе определяли по ГОСТ 4648-2014 «Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб». Для испытаний применяли образцы размером 80×10×4 мм, которые подвергали нагрузкам на измерительном комплексе Instron 5567. Образцы, свободно лежащие на опорах, нагружали методом приложения движущегося с постоянной скоростью наконечника к середине образцов до их разрушения. Расстояние между опорами составляло 80 мм, скорость движения нагружающего наконечника – 20 мм/мин, температура испытаний – 24 ± 1 °С. За результат измерений принимали среднее значение пяти параллельных испытаний.

Результаты физико-механических испытаний экспериментальных образцов ДПК представлены в таблице 3.

Из полученных данных видно, что наиболее высокие показатели при испытании на статический изгиб у композиций ДПК на основе полипропилена и ПЭНД с минимальным содержанием отходов ДПК. При увеличении содержания отходов до 80 мас. % наблюдается снижение прочности на 30-35 %. Наиболее высокой ударной вязкостью отличаются композиции на основе полипропилена и ПЭВД. Лучшими показателями по водопоглощению характеризуются композиции на основе полипропилена и ПЭНД. Это может быть объяснено формированием данными полимерами наиболее прочной и маледефектной матрицы, в которой лигноцеллюлозные включения (даже при высоком процентном содержании) лишены возможности реализовать свои гидрофильные свойства. Сравнительно низкие физико-механические показатели композиций с полимерной матрицей на основе АБС можно объяснить высокой вязкостью расплава данного полимера при используемых температурах переработки (190-195 °С), что ведет к неудовлетворительному смешению компонентов ДПК. Увеличение температуры в зонах экструдера нежелательно вследствие возможного перегрева и деструкции древесного наполнителя в составе отходов ДПК.

Таблица 3. – Физико-механические показатели экспериментальных образцов

№	Композиция	Показатели		
		Водопоглощение, %	Прочность при изгибе, МПа	Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ²
1	ПП (20 %) + отходы ДПК	3,4	18,5	6,2
2	ПП (30 %) + отходы ДПК	3,2	19,1	6,3
3	ПП (40 %) + отходы ДПК	2,9	23,7	6,7
4	ПП (50 %) + отходы ДПК	2,6	26,1	7,1
5	ПЭВД (20 %) + отходы ДПК	4,6	13,3	7,1
6	ПЭВД (30 %) + отходы ДПК	4,2	14,0	6,7
7	ПЭВД (40 %) + отходы ДПК	3,6	14,7	6,9
8	ПЭВД (50 %) + отходы ДПК	3,1	15,3	6,6
9	ПЭНД (20 %) + отходы ДПК	3,7	16,0	5,7
10	ПЭНД (30 %) + отходы ДПК	3,3	17,3	7,7
11	ПЭНД (40 %) + отходы ДПК	3,1	20,4	5,9
12	ПЭНД (50 %) + отходы ДПК	2,9	23,5	6,1
13	АБС (20 %) + отходы ДПК	6,5	12,1	5,7
14	АБС (30 %) + отходы ДПК	6,1	13,0	5,8
15	АБС (40 %) + отходы ДПК	5,5	13,7	5,5
16	АБС (50 %) + отходы ДПК	4,4	14,5	5,3

Заключение. Проведенные в работе исследования позволили установить рецептурно-технологические параметры получения образцов ДПК на основе различных термопластичных связующих, наполненных отходами листового ДПК, проблема переработки которого является весьма актуальной. Это даст возможность расширить область применения данных отходов в производстве и оптимизировать работу промышленной экструзионной линии для изготовления листовых и профильно-погонажных изделий технического и бытового назначения с высокими физико-механическими показателями.

Список использованных источников

1. Клесов, А.А. Древесно-полимерные композиты / А.А. Клесов. – СПб.: Научные основы и технологии, 2010. – 736 с.
2. Natural & Wood Fiber Composites // Principia Partners, Cleveland, OH. – 2005. – Vol. IV, No.10. – P. 1.
3. Шаповалов, В.М. Технология переработки высоконаполненных композитов / В.М. Шаповалов, В.Г. Барсуков, Б.И. Купчинов; под ред. чл.-корр. НАН Беларуси Ю.М. Плескачевского // Гомель: ИММС НАНБ, 2000. – 260 с.
4. Extruded/Injection-Molded Composites Containing Unripe Plantain Flour, Ethylene-Vinyl Alcohol, and Glycerol: Evaluation of Mechanical Property, Storage Conditions, Biodegradability, and Color / A. Vargas [et al.] // J. Appl. Polym. Sci. – 2012. – V. 124. – P. 2632-2639.
5. Полимерная композиция для экструдирования погонажных строительных изделий: пат. 2570435 РФ, МПК C08J5/04 / И.Н. Никульшин; заявитель И.Н. Никульшин. – № 2013150035/05; заявл. 08.11.13; опубл. 20.05.15 // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2015. – Бюл. № 14.
6. Древесно-полимерная композиция на основе поливинилхлорида для профильно-погонажных изделий: пат. 2436816 РФ, МПК C08L27/06, C08L97/02 / Ф.И. Афанасьев,

Р.Н. Фаткуллин, А.В. Виноградов [и др.]; заявитель ОАО «Каустик». – № 2009145355/05; заявл. 07.12.09; опубл. 20.12.11 // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2011. – Бюл. № 35.

7. Древесно-полимерная композиция для профильно-погонажных изделий: пат. 2530356 РФ, МПК C08L97/02, C08L27/06 / Ф.И. Афанасьев, Р.Н. Фаткуллин, Р.Ф. Нафикова [и др.]; заявитель ОАО «Башкирская содовая компания». – № 2012148350/05; заявл. 13.11.12; опубл. 10.10.14 // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2014. – Бюл. № 28.

8. High-toughness PVC (Polyvinyl Chloride) wood polymer plastic: CN 103319804 A, International Patent Classification: C08L27/06, C08K13/02, C08K5/11, C08K5/12, C08K3/30, C08K5/098 / Inventor: Dong Jianzhong; Current Assignee: WUJIANG DONGXIN PLASTIC PACKAGING FACTORY; Priority 20.06.13; Publication 25.09.13.

9. Древесно-наполненная пластмасса и способ ее получения: пат. 2493184 РФ, МПК C08L97/02, C08L23/06, C08L23/12, C08L27/06, C08L33/12 / Р.Р. Амиров, В.В. Горбачук, Л.М. Амирова, О.Н. Беззаметнов; заявитель ФГАОУ ВПО КФУ. – № 2012121549/05; заявл. 24.05.12; опубл. 20.09.13 // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2013. – Бюл. № 26.

10. Древесно-полимерная композиция: пат. 2484110 РФ, МПК C08L97/02 / В.М. Ушанова, А.И. Криворотова; заявитель ФГБОУ ВПО «СибГТУ». – № 2011129135/05; заявл. 13.07.11; опубл. 10.06.13 // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2013. – Бюл. № 16.

11. Лигноцеллюлозный полимерный композиционный материал: пат. 2595655 РФ, МПК C08L97/02, C08L23/06, C08L23/12, C08L25/06, C08L27/06 / В.А. Реутов, Л.А. Лим, А.М. Заболотная, Д.А. Макеич; заявитель ФГАОУ ВПО «ДВФУ». – № 2015106746/05; заявл. 26.02.15; опубл. 27.08.16 // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2016. – Бюл. № 24.

12. Полимерная композиция: пат. 2569544 С1 РФ, МПК C08L23/06, C08L97/02 / В.Н. Водяков, А.М. Кузьмин, В.В. Кузнецов, Т.В. Ошина; заявитель ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева». – № 2014128742/05; заявл. 11.07.14; опубл. 27.11.15 // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2015. – Бюл. № 33.

13. Состав для древесно-полимерного композиционного материала: пат. 2543870 РФ, МПК C08L97/02, C08L23/12, C08K3/00, C08K5/00 / А.В. Карпинский; заявитель А.В. Карпинский. – № 2011104155/05; заявл. 08.02.11; опубл. 10.03.15 // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2015. – Бюл. № 7.

14. Способ получения высоконаполненной древесно-полимерной композиции на основе поливинилхлорида: пат. 2527468 РФ, МПК C08L97/02, C08L27/06, C08K3/36 / А.Х. Ашрапов, А.И. Бурнашев, Л.А. Абдрахманова [и др.]; заявитель ФГБОУ ВПО «КГАСУ». – № 2013122618/05; заявл. 16.05.13; опубл. 27.08.14 // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2014. – Бюл. № 24.

15. Wood-polymer-zeolite composites: International Application WO 2007/041168 A3, International Patent Classification: C08J3/20, B29C70/00 / Inventors/Applicants: Fisher, Erm, D., Wypart, Roman, W., Marcus, Bonita, Kristoffersen; Applicant PQ HOLDING, INC [US/US]. – International Filing Date: 27.09.06; International Publication Date: 12.04.07 // World Intellectual Property Organization International Bureau.

Информация об авторах

Виктор Михайлович Шаповалов – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом № 1 «Композиционные материалы и рециклинг полимеров», ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси» (ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь), e-mail: mpri@mail.ru.

Константин Владимирович Овчинников – научный сотрудник отдела № 1, ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси» (ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь), e-mail: mpri@mail.ru.

Сергей Федорович Мельников – ведущий научный сотрудник отдела № 3, ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси» (ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь), e-mail: mpri@mail.ru.

Андрей Викторович Шаповалов – младший научный сотрудник отдела № 2, ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси» (ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь), e-mail: mpri@mail.ru.

Роман Семенович Напреев – заместитель директора по развитию, ОДО «Полидрев» (ул. Бабушкина, 1, 246024, г. Гомель, Беларусь), e-mail: info@polydrev.by.

Information about the authors

Victor Mihailovich Shapovalov – D.Sc. in Engineering sciences, Professor, Head of the Department No. 1 “Composite materials and recycling of polymers”, V.A. Belyi Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems of the National Academy of Sciences of Belarus (32a, Kirova Str., 246050, Gomel, Belarus), e-mail: mpri@mail.ru.

Konstantin Vladimirovich Ovchinnikov – researcher of the Department No. 1, V.A. Belyi Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems of the National Academy of Sciences of Belarus (32a, Kirova Str., 246050, Gomel, Belarus), e-mail: mpri@mail.ru.

Sergey Fedorovich Melnikov – leading researcher of the Department No. 3, V.A. Belyi Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems of the National Academy of Sciences of Belarus (32a, Kirova Str., 246050, Gomel, Belarus), e-mail: mpri@mail.ru.

Andrey Viktorovich Shapovalov – junior researcher of the Department No. 2, V.A. Belyi Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems of the National Academy of Sciences of Belarus (32a, Kirova Str., 246050, Gomel, Belarus), e-mail: mpri@mail.ru.

Roman Semenovich Napreev – deputy director for development, ALC “Polydrev” (1, Babushkina Str., 246024, Gomel, Belarus), e-mail: info@polydrev.by.

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.

ЖУРАВКОВ МИХАИЛ АНАТОЛЬЕВИЧ
(к 60-летию со дня рождения)



19 ноября 2021 г. отметил свой юбилей заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики БГУ, доктор физико-математических наук, профессор Журавков Михаил Анатольевич – академик Российской Академии горных наук; член Высшего Академического Совета Евразийской Академии горных наук; член-корреспондент Международной Академии Наук по Экологии и Безопасности Жизнедеятельности; член Президиума международного комитета по проблемам охраны окружающей среды в минеральном произ-

водстве и энергетике по горному планированию и автоматизации горных работ; член Экспертного Совета по фундаментальным исследованиям Министерства Образования Республики Беларусь.

М.А. Журавков известный ученый в области фундаментальных и прикладных проблем геомеханики, геоэкологии, механики деформируемого твердого тела, механики сплошных сред, биомеханики, методов математического и компьютерного моделирования в механике, математических основ ГИС- и САПР-технологий в геомеханике.

М.А. Журавков является основателем и руководителем белорусской научной школы по геомеханике, математическим и компьютерным методам моделирования геомеханических процессов, хорошо известной и имеющей признание в стране и за рубежом; разработчиком теории и математических основ деформирования блочно-слоистых массивов горных пород применительно к месторождениям калийных солей; механико-математических моделей, алгоритмов и компьютерных технологий для решения широкого класса задач геомеханики; научных основ проектирования автоматизированных корпоративных геомониторинговых систем для регионов крупномасштабного освоения подземного пространства; новых подходов к созданию геолого-гидродинамических и численных моделей процессов нефтеизвлечения, на основе которых создано соответствующее алгоритмическое и программное обеспечение.

Научные результаты его работ вошли в ряд нормативных документов бывшего союзного государства и Республики Беларусь, в многочисленные монографии, научные статьи. Высокий научный авторитет проф. М.А. Журавкова подтверждается участием в научных конгрессах и конференциях, в работе советов по защитах диссертаций, редколлегий республиканских и международных журналов, участием в качестве эксперта при оценке важных проектов, в различных авторитетных международных комитетах, комиссиях, организациях. М.А. Журавков является координатором, руководителем и участником многих государственных и межгосударственных фундаментальных и прикладных программ научных исследований.

Результаты его научно-исследовательских работ получили высокую оценку и признание в научном сообществе. Он имеет государственные награды.

Поздравляем Михаила Анатольевича с юбилеем и желаем крепкого здоровья, большого личного счастья, дальнейшей плодотворной профессиональной деятельности, неиссякаемой энергии и оптимизма!

Перечень статей, опубликованных в журнале
«Горная механика и машиностроение» в 2021 году

№ 1

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Довгалева А.М. Моделирование процесса деформирования поверхности детали гладким шаром при совмещенном магнитно-динамическом накатывании	5
Дворник А.П., Калинин Ю.В., Клемба В.Л., Березовский Н.И. Повышение надежности и безопасности шахтных подъемных установок	13
Казаченко Г.В., Басалай Г.А. Некоторые задачи оптимизации конструкций и режимов работы ленточных конвейеров	21
Вишняк Б.А., Сереброва Т.В., Колунтаев И.В., Хныкин А.Г. Технология и автоматизированное управление процессами современной калийной обогатительной фабрики	29
Моисеенко В.Л., Дмитриев А.В., Максимчик К.В., Письменная Н.В. Гибридный привод на железнодорожном транспорте	40
Довгалева В.А., Моисеенко В.Л., Жигар В.И., Письменная Н.В. Проведение экспериментов на имитационной модели звеносборочной линии КБ03 и анализ полученных результатов	49
Диулин Д.А., Кузнецова М.Г. Подходы к моделированию стволов шахт	55
Высоцкая Н.А., Францкевич В.С. Влагосодержание шихты комплексных удобрений	63
Казаченко Г.В., Басалай Г.А. О повышении эффективности щеленарезных машин	71

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Кудина Е.Ф., Приходько И.В. Современные смазочные материалы: тенденции развития и перспективы рециклинга	76
Можейко Ф.Ф., Поткина Т.Н., Шевчук В.В. Влияние карбоксиметилцеллюлозы различной химической природы на показатели флотации калийной руды	87
Павленко А.П., Ахраменко Н.А., Буй М.В. Определение оптимальных условий спекания изделий из корундовой керамики	93

№ 2

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

Лысенко М.В., Аушев Е.В., Дорохин Н.С. Поддержание широких горных выработок и сопряжений двухуровневой анкерной крепью	5
Джураев Р.У., Кахаров С.К., Кологривко А.А., Мустафаев О.Б. О возможности предупреждения и ликвидации поглощений бурового раствора при бурении скважин в осложненных геологических условиях	13
Березовский Н.И., Борисейко В.В., Костюкевич Е.К., Клименок М.В. Разработка методики по использованию рукавных фильтров в торфобрикетном производстве	19

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Громыко П.Н., Хатетовский С.Н., Макацария Д.Ю. Совершенствование механизма передачи движения на выходное звено в эксцентриковых передачах типа К-Н-V	27
Довгалева А.М. Определение параметров процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания	34
Коднянко Е.В., Дворник А.П. Анализ показателей технического состояния вертикальных стволов шахт и жесткой армировки	40
Моисеенко В.Л., Жигар В.И., Письменная Н.В. Методика построения имитационных моделей звеносборочных линий	46

Кудина Е.Ф., Приходько И.В., Карпенко В.В., Курицын П.А. Влияние климатических факторов на работоспособность электрооборудования	55
Цыбуленко П.В., Казаченко Г.В. Особенности прессования мелкодисперсных материалов в валковых прессах	65
Довгяло В.А., Девицкий Д.С., Максимчик К.В. Анализ факторов, влияющих на работоспособность подбивочных блоков путевых машин	71
Павлечко В.Н. Параметры среды в каналах радиальной турбины при изменении угла наклона лопастей	78
Басалай Г.А. Динамические модели приводов соосных роторов проходческих комбайнов типа ПКС-8 и КРП-3	84

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Францкевич В.С., Новик Д.М. Исследование коррозионной стойкости нержавеющей стали 1.4462 в насыщенных солевых растворах	89
Богданович П.Н., Станкевич В.М., Коднянко М.Ю. Изнашивание полиуретана незакрепленными абразивными частицами	98

ЛЮДИ НАУКИ

Рыспанов Нурлан Бектасович (к 60-летию со дня рождения)	104
--	-----

№ 3

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

Березовский Н.И., Воронова Н.П., Костюкевич Е.К., Матвиенко Д.С. Математическое моделирование процесса термодинамического разрушения мерзлых пород при бурении скважин	5
Оника С.Г., Цыбуленко П.В., Астапенко Т.С., Дереповская Е.Р. Инновационное технологическое обеспечение эффективной разработки карбонатного сырья в условиях карьеров с большой производственной мощностью	11

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Шелег В.К., Довгалева А.М., Тарадейко И.А. Повышение эффективности процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания	17
Павлечко В.Н. Параметры среды в каналах центростремительной турбины при изменении угла наклона лопастей	25
Бровка Г.П., Шилович Н.Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния неоднородного полого цилиндра с неподвижной внешней боковой границей при осесимметричной нагрузке	31
Гуцев Д.М., Скороход А.З., Моисеенко В.Л. Разработка технической документации устройства для механизации путевых работ	41
Вишняк Б.А., Сереброва Т.В. Автоматизированное управление комплексом процессов фильтрования и сушки концентрата сильвинитовой обогатительной фабрики	49
Высоцкая Н.А. Основные физико-химические и структурно-механические свойства гранулированных минеральных удобрений	59
Тройнич В.А., Гридюшко Д.В., Брижевич А.В. Модернизация бункера-перегрузателя путем установки на него барового исполнительного органа	66
Басалай Г.А. Динамическая модель одномоторного привода соосных роторов проходческого комбайна	75

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Поддубный А.А., Петрусеви́ч В.В., Кацу́бо П.А. Оценка изменения гидрофобности поверхности дорожно-строительных материалов посредством определения краевого угла смачивания	80
Инютин В.И., Кожедуб С.С., Краснов М.А., Шаповалов В.М. Исследование влияния модифицирующих добавок на эксплуатационные свойства композиционного материала	85
Лашкина Е.В. Инсектицидная полимерная пленка, модифицированная функциональными наполнителями	92
Подобед Д.Л. Влияние функциональных добавок на специальные свойства термопластов	99

ЛЮДИ НАУКИ

Войтов Игорь Витальевич (к 60-летию со дня рождения)	106
Марукович Евгений Игнатьевич (к 75-летию со дня рождения)	107

№ 4

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

Ушаповский И.Ф., Кафанова Т.П., Прохоров Н.Н., Ефимов А.М. Применение комплекса подземных геофизических исследований в горных выработках, пересекающих Краснослободскую зону разломов	5
Журавков М.А., Николайчик М.А. Конечно-элементное моделирование взаимодействия подъемного сосуда с конструктивными элементами шахтного ствола	15
Диулин Д.А. Оценка напряженно-деформированного состояния крепи вертикальных шахтных стволов Старобинского месторождения калийных солей	22
Гарнишевский А.А. Влияние различных схем направления очистной выемки и передвижки забойной крепи на степень нагруженности призабойного пространства нижних лав при слоевой выемке Третьего калийного пласта	29
Довгелюк Н.В., Масловская Е.М., Толочко З.Ю. Усиление земляного полотна железной дороги под обращение длинносоставных тяжеловесных поездов	42
Довгелюк Н.В., Масловская Е.М., Царенков А.А. Повышение безопасности движения поездов в районах с оползневой опасностью склонов земляного полотна	49

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Басалай Г.А. Динамическая модель привода бермовых фрез и отрезных коронок проходческого комбайна с соосными роторами	55
Попов В.Б., Погуляев М.Н., Веппер Л.В., Логвин В.В. Обнаружение дефектов подшипников электрических машин с помощью современных методов контроля	60
Кляус О.Н., Жолобов А.А. Теоретическое обоснование направления осей отверстий при их рассверливании и зенкерования	67
Попов В.Б., Баран И.А. Компьютерное моделирование аэродинамического процесса в системе очистки самоходного зерноуборочного комбайна	74

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Шаповалов В.М., Овчинников К.В., Мельников С.Ф., Шаповалов А.В., Напеев Р.С. Влияние отходов листового древесно-полимерного композита на физико-механические свойства композиционных материалов на основе термопластов	82
---	----

ЛЮДИ НАУКИ

Журавков Михаил Анатольевич (к 60-летию со дня рождения)	92
---	----

**A list of articles that have been published in the journal
«Mining mechanical engineering and machine-building» in 2021**

№ 1

MACHINE-BUILDING

Dovgalev A.M. Simulation of surface deformation produced by smooth ball under combined magnetodynamic treatment	5
Dvornik A.P., Kalintsau Yu.V., Klemba V.L., Berezovsky N.I. Increasing the safety and reliability of mine winding plants	13
Kazachenko G.V., Basalai R.A. Some construction optimization problems and operating modes of belt conveyors	21
Vishnyak B.A., Serebrova T.V., Koluntaev I.V., Khnykin A.G. Technology and automated process control of a modern potash processing plant	29
Moiseenko V.L., Dmitriev A.V., Maksimchyk K.V., Pismennaya N.V. Hybrid drive on railway transport	40
Dovgualo V.A., Moiseenko V.L., Zhigar V.I., Pismennaya N.V. Conducting experiments on the simulation model of the assembly line KB03 and analysis of the results obtained	49
Diulin D.A., Kuzniatsova M.R. Approaches to mine shafts modeling	55
Vysotskaya N.A., Frantskevich V.S. Moisture content of the charge of complex fertilizers	63
Kazachenko G.V., Basalai R.A. About increasing the efficiency of slot-cutting machines	71

MATERIALS ENGINEERING

Kudina H.F., Prihodzko I.V. Modern lubricants: development trends and prospects of recycling	76
Mozheyko F.F., Potkina T.N., Shevchuk V.V. Influence carboxymethyl cellulose of different chemical nature on potassium ore flotation qualitative characteristics	87
Pavlenko A., Akhramenko N., Bui M. Determination of optimal conditions of sintering of corundum ceramic products	93

№ 2

GEOTECHNOLOGY

Lysenko M.V., Aushev E.V., Dorohin N.S. Supporting wide mine workings and intersections by two-level roof bolting	5
Juraev R.U., Kakharov S.K., Kologrivko A.A., Mustafayev O.B. About the possibility of prevention and elimination of drilling mud absorption when drilling of wells in hard geological conditions	13
Berezovsky N.I., Boriseyko V.V., Kostyukevich E.K., Klimenok M.V. Development of a technique for use of bag filters in the peat briquetting production	19

MACHINE-BUILDING

Gromyko P.N., Khatetovsky S.N., Makatsaryia D.Yu. Improvement of mechanism of motion transfer to output link in eccentric transmissions of K-H-V type	27
Dovgalev A.M. Determination of the parameters of the combined magnetic-dynamic rolling process	34
Kadnianska A.V., Dvornik A.P. Analysis of technical condition of indicators of vertical mines and rigid reinforcement	40
Moiseenko V.L., Zhigar V.I., Pismennaya N.V. Methodology for constructing simulateon models of link assembly lines	46
Kudina H.F., Prihodzko I.V., Karpenko V.V., Kuritsyn P.A. Influence of climatic factors on performance of electrical equipment	55
Tsybulenka P.V., Kazachenko G.V. Features of pressing fine materials in roll presses	65
Dovgyalo V.A., Devitsky D.S., Maksimchyk K.V. Analysis of factors that affect the performance of road vehicle padding blocks	71

Pavlechko U.N. Parameters of the medium in the channels of a radial turbine when the angle of inclination of the blades changes	78
Basalai R.A. Dynamic drive models of coaxial rotors of tunnelling machines of the type PKS-8 and KRP-3	84

MATERIALS ENGINEERING

Frantskevich V.S., Novik D.M. Study of corrosion resistance of stainless steel 1.4462 in saturated salt solutions	89
Bogdanovich P.N., Stankevich V.M., Kadnianska M.Yu. Polyurethane wear by unfixed abrasive particles	98

PEOPLE OF SCIENCE

Ryspanov Nurlan Bektasovich (for the 60 th anniversary)	104
---	-----

№ 3

GEOTECHNOLOGY

Berezovsky N.I., Voronova N.P., Kostyukevich E.K., Matvienko D.S. Mathematical modeling of the thermodynamic destruction process of frozen rocks during well drilling	5
Onika S.G., Tsybulenko P.V., Astapenko T.S., Derepovskaya E.R. Innovative technological support of the effective development of carbonate raw material in open pits with large production capacity	11

MACHINE-BUILDING

Sheleg V.K., Dovgalev A.M., Taradeiko I.A. Increasing the efficiency of the magnetic dynamic rolling process	17
Pavlechko V.N. Parameters of the medium in the inward-flow turbine channels when changing the inclination angle of the blades	25
Brovka G.P., Shilovich N.N. Simulation of the stress-strain state of inhomogeneous quill cylinder with a fixed external lateral boundary under axisymmetric load	31
Gutsev D.M., Skorohod A.Z., Moiseenko V.L. Development of technical documentation of the device for trackwork mechanization	41
Vishnyak B.A., Serebrova T.V. Automated control of the complex of processes of concentrate filtering and drying of the silvinit concentration plant	49
Vysotskaya N.A. Basic physico-chemical and structural-mechanical properties of granulated mineral fertilizers	59
Troinich V.A., Hrydziushka D.V., Bryzhevich A.V. Modernization of a hopper for pumping ore by installing a device for cutting slits on it	66
Basalai R.A. Single-motor drive dynamic model of coaxial rotors of road heading machine	75

MATERIALS ENGINEERING

Poddubny A.A., Petrusevich V.V., Katsubo P.A. Change assessment in hydrophobicity of the surface of road materials by means of determination the limiting wetting angle	80
Iniutin V.I., Kozhedub S.S., Krasnov M.A., Shapovalov V.M. Modifying additive impact study on composite material service characteristics	85
Lashkina E.V. Insecticidal polymer film modified with functional fillers	92
Podobed D.L. The effect of functional additives on special properties of thermoplastic materials	99

PEOPLE OF SCIENCE

Voitov Igor Vitalievich (for the 60 th anniversary)	106
Marukovich Evgeny Ignatievich (for the 75 th anniversary)	107

№ 4

GEOTECHNOLOGY

Ushchapousky I.F., Kafanova T.P., Prohorov N.N., Efimov A.M. Application of a set of underground geophysical studies in mine workings crossing the Krasnoslobodskaya fault zone	5
Zhuravkov M.A., Nikolaitchik M.A. Finite element modeling of the lifting vessel interaction with the mine shaft structural elements	15
Diulin D.A. Assessment of the stress-strain state supports of vertical mine shafts Starobinsky potash salt deposit	22
Harnisheusky A.A. The influence of various schemes of the direction of the cleaning excavation and the movement of the downhole support to the degree of loading bottom-hole space of the lower lavas during the layered excavation of the Third potash reservoir	29
Dovgelyuk N.V., Maslovskaya E.M., Tolochko Z.Yu. Reinforcement of the railway roadbed for the circulation of long-composite heavy-weight trains	42
Dovgelyuk N.V., Maslovskaya E.M., Tsarenkov A.A. Improving the safety of train traffic in areas with landslide hazard of earth bed slopes	49

MACHINE-BUILDING

Basalai R.A. Dynamic model of the drive of the burm milling cutters and cutting crowns of a tunneling combine with coaxial rotors	55
Popov V.B., Pogulyaev M.N., Vepper L.V., Logvin V.V. Detection of defects of electric bearings machines using modern control methods	60
Klyaus O.N., Zholobov A.A. Theoretical justification of the direction of the axes of the holes during their reaming and countersinking	67
Popov V.B., Baran I.A. Computer simulation of the aerodynamic process in the cleaning system of a self-propelled grain harvester	74

MATERIALS ENGINEERING

Shapovalov V.M., Ovchinnikov K.V., Melnikov S.F., Shapovalov A.V., Napreev R.S. Influence of sheet WPC waste on the physical and mechanical properties of composite materials based on thermoplastics	82
--	----

PEOPLE OF SCIENCE

Zhuravkov Michael (for the 60 th anniversary)	92
---	----

Уважаемый рецензент, при написании рецензии просьба руководствоваться следующими рекомендациями:

1. Соответствие статьи выбранному научному направлению: геотехнология, материаловедение или машиностроение.
2. Актуальность темы, новизна полученных результатов, значимость, их научно-теоретическая, методологическая и практическая ценность, достоверность в сопоставлении с соответствующими известными данными.
3. Логика изложения и четкость формулировок.
4. Информативность и качество иллюстрированного материала.
5. Полнота списка литературы, наличие публикаций последних лет и зарубежных публикаций в данной области.
6. Соответствие аннотации и названия тексту статьи.
7. Оценка представленных научных результатов и обоснованность выводов.
8. Мнение рецензента о возможности публикации статьи после исправлений (без исправлений) или необходимости отклонить статью.

Dear reviewer, when writing a review, please follow the following recommendations:

1. Compliance of the article with the chosen scientific direction: geotechnology, materials engineering or machine-building.
2. The relevance of the topic, the novelty of the results obtained, their significance, their scientific and theoretical, methodological and practical value, and their reliability in comparison with the corresponding known data.
3. Logic of presentation and clarity of wording.
4. Information content and quality of the illustrated material.
5. Completeness of the list of references, availability of recent publications and foreign publications in this field.
6. Matching the annotation and title to the text of the article.
7. Evaluation of the presented scientific results and validity of the conclusions.
8. The reviewer's opinion on the possibility of publishing the article after corrections (without corrections) or the need to reject the article.

Статьи, направленные в редакцию журнала, должны удовлетворять требованиям «Инструкции о порядке оформления квалификационной научной работы (диссертации) на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук, автореферата и публикаций по теме диссертации», утвержденной Постановлением Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь № 3 от 28.02.2014.

1. Статья должна быть представлена в распечатанном и в электронном виде, должна иметь разрешение на опубликование, сопроводительное письмо.
2. Поступившие в редакцию статьи проходят рецензирование. Основные критерии целесообразности опубликования – актуальность тематики, научная новизна, значимость результатов.
3. Объем научной статьи по теме диссертации должен составлять не менее 14000 печатных знаков (не менее 5-6 страниц), включая пробелы.
4. Статья должна быть представлена в формате текстового редактора Microsoft Word. Шрифт текста Times New Roman, размер 12 п., интервал – 1.
5. В статье должны быть указаны индекс УДК, название статьи, фамилии и инициалы авторов (число авторов – не более 4), полные наименования учреждений, где работают авторы. Статья должна содержать: аннотацию (до 10 строк), ключевые слова (до 10), введение, основную часть, заключение, завершаемое четко сформулированными выводами, список использованных источников (не более 20). Аннотация, название статьи, ключевые слова, а также фамилии авторов должны быть представлены на английском и русском языках.
6. Таблицы и рисунки располагаются непосредственно в тексте статьи. Количество рисунков и таблиц не должно превышать 8. Рисунки должны быть четкими и созданы в одном из графических редакторов (формат jpg, tif, psx, bmp, gif, cdr, wmf, psd). Каждая таблица должна иметь заголовок, а рисунок – подрисуночную надпись. На все таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте.
7. Формулы должны быть созданы в редакторе «Math Type». Все обозначения, приведенные в статье, расшифровываются непосредственно в тексте, кроме того, могут быть вынесены на отдельную страницу.
8. Не следует употреблять сокращения, кроме общепринятых.
9. Оформление списка использованных источников должно соответствовать требованиям ГОСТ 7.1-2003. Список должен быть составлен в порядке упоминания ссылок в тексте. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Список должен содержать зарубежные публикации в данной области (при их наличии).
10. Необходимо представить на отдельной странице следующие сведения на русском и английском языках для каждого автора: фамилия, имя, отчество (полностью), ученую степень, звание, должность и место работы, адрес и e-mail организации, почтовый адрес для переписки, номера телефонов, ID ORCID.

1. The article should be presented in printed out and electronic forms, should have a security clearance, a covering letter.
2. Received articles are reviewed. The main criteria of feasibility of the publication are the subject relevance, the scientific novelty, the significance of results.
3. The volume of scientific article on the topic of thesis research must be at least 14000 typographical units, including spaces, (at least 5-6 pages).
4. The article should be presented in the text editor Microsoft Word format. The font is Times New Roman, font size is 12, interval – 1.
5. The UDC number, the article's title, the authors' surnames and initials (number of authors – maximum 4), full names of organizations where the authors work should be included in the article. The article should contain: the summary (up to 10 lines), keywords (up to 10), the introduction, the article's body, the conclusion finished by clearly formulated findings, and the list of cited references (maximum 20). The summary, the article's title, keywords as well as the authors' surnames should be presented in English and Russian languages.
6. Tables and figures are placed directly in the article text. The number of figures and tables should not exceed 8. The figures should be well-defined and should be created in one of graphic editors (jpg, tif, psx, bmp, gif, cdr, wmf, psd format). Each table should have a title, and each figure – a picture caption. All tables and figures should have references in the text.
7. Formulae should be created in the “Math Type” editor program. All symbols given in the article are deciphered directly in the text; in addition the symbols may be published on a separate page.
8. Abbreviations should not be used, except commonly used abbreviations.
9. Presentation of references must comply with the requirements of GOST 7.1-2003. The list should be made in order as the references are mentioned in the text. The references to unpublished works are not allowed. The list should include foreign publications in this sphere (if available).
10. It is necessary to submit on a separate page the following information in Russian and English for each author: name, surname, patronymic (in full), academic degree, title, position, place of work, address and e-mail of the organization, postal address for correspondence, phone numbers, ID ORCID.



Подписные индексы:

печатной	74933
версии журнала	749332
электронной	30006
версии журнала	300062

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

- совершенствование технологий добычи и повышение безопасности ведения горных работ на месторождениях полезных ископаемых;
- моделирование и автоматизированное проектирование горных машин, работающих на глубине более 1000 м во взрывоопасной среде и при больших давлениях кровли;
- разработка горно-шахтного подъемно-транспортного оборудования;
- разработка горного проходческого, очистного и бурового оборудования;
- разработка технологического горно-обогачительного оборудования;
- разработка методов повышения надежности и долговечности деталей и узлов машин, работающих в условиях абразивных, химически активных сред горно-обогачительных предприятий;
- разработка оборудования для комплексов по перегрузке и складированию сыпучих материалов;
- разработка высокопроизводительных технологий обогащения полезных ископаемых;
- разработка композиционных и теплозвукоизоляционных материалов;
- разработка конструкционных материалов и покрытий, предназначенных для использования в агрессивных химически активных, абразивных средах предприятий горной промышленности;
- разработка автоматизированных систем управления горно-шахтным добывающим и перерабатывающим оборудованием.

Адрес редакции:

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

ISSN 1728-3841



Контактные данные:

главный редактор (+375 174) 26 28 37
редакция (+375 174) 33 01 07
e-mail: onti@sipr.by
<http://www.sipr.by>