



Научно-технический вестник

БРЯНСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

*Nauchno-Tekhnicheskiiy Vestnik
Bryanskogo Gosudarstvennogo
Universiteta*

Б Р Я Н С К

2025(3)

ISSN 2413-9920

**Научно-технический
ВЕСТНИК
Брянского
государственного
университета**

**№ 3
2025**

**Nauchno-tekhnicheskij
VESTNIK
Bryanskogo
gosudarstvennogo
universiteta**

**Scientific and Technical Journal of
Bryansk State University**

**№ 3
2025**

ББК 74.580.4

Н-34

Научно-технический вестник Брянского государственного университета. № 3 (2025). Брянск:
РИСО БГУ, 2025. – Точка доступа: <http://ntv-brgu.ru>

Размещено на официальном сайте журнала: 25.09.2025

Решением Высшей Аттестационной комиссии при Минобрнауки России с 07 марта 2023 г. сетевое издание «Научно-технический вестник Брянского государственного университета» включено в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим специальностям научных работников:

2.5.2 – Машиноведение (технические науки);

2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки);

2.5.21 – Машины, агрегаты и технологические процессы (технические науки)

Решением Высшей Аттестационной комиссии при Минобрнауки России (письмо от 06 декабря 2022 г. № 02-1198) сетевое издание «Научно-технический вестник Брянского государственного университета» отнесено к категории К2

Решением Межведомственной рабочей группы (протокол от 17.07.2025 № ДС/110) сетевое издание «Научно-технический вестник Брянского государственного университета» отнесено к уровню 3 Единого государственного перечня научных изданий - «Белый список»

Председатель Редакционного совета БГУ им. акад. И.Г. Петровского:

А.В. Антюхов – доктор филологических наук, профессор, ректор Брянского государственного университета им. акад. И.Г. Петровского (г. Брянск, Россия).

Главный редактор сетевого издания:

А.В. Лагереv – доктор технических наук, профессор (г. Брянск, Россия)

Ответственный секретарь сетевого издания:

И.В. Мельников – кандидат биологических наук, начальник Редакционно-издательского отдела Брянского государственного университета им. акад. И.Г. Петровского (г. Брянск, Россия).

Редакционная коллегия сетевого издания:

Д.В. Артамонов – доктор технических наук, первый проректор Пензенского государственного университета (г. Пенза, Россия);

Н.И. Баурова – доктор технических наук, декан факультета дорожных и технологических машин Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (г. Москва, Россия);

В.В. Беляков – доктор технических наук, начальник управления научно-исследовательских и инновационных работ Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (г. Нижний Новгород, Россия);

А.В. Вершинский – доктор технических наук, профессор кафедры подъемно-транспортных систем Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (г. Москва, Россия);

К.А. Гончаров – доктор технических наук, профессор кафедры наземных транспортно-технологических средств Российского университета транспорта (г. Москва, Россия);

А.А. Короткий – доктор технических наук, заведующий кафедрой транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета (г. Ростов-на-Дону, Россия);

А.В. Лагереv – доктор технических наук, профессор (г. Брянск, Россия);

И.А. Лагереv – доктор технических наук, и.о. ректора Кубанского государственного технологического университета (г. Краснодар, Россия);

В.М. Пашкевич – доктор технических наук, проректор по научной работе Белорусско-Российского университета (г. Могилев, Беларусь);

А.В. Рыбаков – доктор технических наук, начальник лаборатории информационного обеспечения населения и технологий информационной поддержки Академии гражданской защиты МЧС России (г. Химки, Россия).

Editorial Council Chairman of Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University:

A.V. Antyukhov – Doctor of Philological Sciences, Professor, Rector at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russia).

Chief editor:

A.V. Lagerev - Doctor of Technical Sciences, Professor (Bryansk, Russia).

Executive secretary:

I.V. Melnikov – Candidate of Biological Sciences, Chief of Editorial-publishing Department at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russia).

Editorial Board:

D.V. Artamonov – Doctor of Technical Sciences, first Vice rector at Penza State University (Penza, Russia);

N.I. Baurova – Doctor of Technical Sciences, Dean of faculty of road and technological machines at Moscow automobile and road construction state technical University (Moscow, Russia);

V.V. Belyakov – Doctor of Technical Sciences, Head of research and innovation Department at Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (Nizhny Novgorod, Russia);

K.A. Goncharov – Doctor of Technical Sciences, Professor of chair of land transport and technological means at Russian University of Transport (Moscow, Russia);

A.V. Vershinsky - Doctor of Technical Sciences, Professor of chair of Lifting and transport system at Moscow State Technical University named N.E. Bauman (Moscow, Russia);

A.A. Korotky - Doctor of Technical Sciences, Head of chair of transport systems and logistics at Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia);

A.V. Lagerev - Doctor of Technical Sciences, Professor (Bryansk, Russia);

I.A. Lagerev – Doctor of Technical Sciences, Rector at Kuban State Technological University (Krasnodar, Russia);

V.M. Pashkevich - Doctor of Technical Sciences, Vice rector at Belarusian-Russian University (Mogilev, Belarus Republic);

A.V. Rybakov - Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory of information technologies and providing the population at Academy of civil defence EMERCOM of Russia (Khimki, Russia);

Электронный журнал «Научно-технический вестник Брянского государственного университета» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации: Эл № ФС77-62798 от 18 августа 2015 г.

16+

Ответственность за точность фактологического материала, используемого в статьях, несут авторы.

© Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2025
© 2025 Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta



The Journal and its metadata are licensed under CC BY-SA

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ЖУРНАЛ ВКЛЮЧЕН
В ПЕРЕЧЕНЬ ВАК РФ**Машиноведение, наземные транспортно-технологические средства и процессы**

Статьи, опубликованные в этом разделе, соответствуют требованиям Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, на соискание ученой степени кандидата наук по специальностям научных работников 2.5.2; 2.5.11; 2.5.21

Статьи, опубликованные в этом разделе, соответствуют требованиям к журналам категории K2 Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, на соискание ученой степени кандидата наук (Информационное письмо ВАК при Минобрнауки России от 06.12.2022 № 02-1198)

Статьи, опубликованные в этом разделе, соответствуют требованиям к журналам уровня 3 Единого государственного перечня научных изданий - «Белый список» (Протокол заседания Межведомственной рабочей группы от 17.07.2025 № ДС/110)

Афанасьев М.А., Тюремнов И.С. (Ярославль, Россия)

DOI: 10.22281/2413-9920-2025-11-03-226-238

Анализ способов обеспечения самоходности виброплит 226

Власенко Д.А. (Липецк, Россия)

DOI: 10.22281/2413-9920-2025-11-03-239-248

Обоснование межвалкового зазора валковых дробилок с рифлеными рабочими органами 239

Гончаров К.А. (Москва, Россия)

DOI: 10.22281/2413-9920-2025-11-03-249-255

Особенности применения элементов автоматизации обработки и аналитики данных при тяговом расчете многоприводных ленточных конвейеров 249

Закиров Р.Г. (Челябинск, Россия)

DOI: 10.22281/2413-9920-2025-11-03-256-264

Моделирование динамических характеристик и анализ режимов управления в роторном виброприводе с кинематически неуравновешенной массой 256

Казаков О.Ю., Савельев А.Г. (Москва, Россия)

DOI: 10.22281/2413-9920-2025-11-03-265-277

Обоснование направления вращения рабочего органа комбинированного уплотняющего оборудования для асфальтобетонных смесей 265

Корытов М.С., Кашапова И.Е., Щербаков В.С. (Омск, Россия)

DOI: 10.22281/2413-9920-2025-11-03-278-288

Виброзащитные системы сидений операторов с двухсегментной кусочно-линейной статической силовой характеристикой 278

Сладкова Л.А., Борисов И.К. (Москва, Россия)

DOI: 10.22281/2413-9920-2025-11-03-289-297

Методика определения параметров усовершенствованных выносных опор стреловых самоходных кранов 289

Таричко В.И., Лагерева А.В., Мазлумян Г.С. (Москва, Россия)

DOI: 10.22281/2413-9920-2025-11-03-298-311

Изменение во времени надежности механической трансмиссии многоосных колесных шасси 298

Фомин Н.А., Хлопков В.П., Носко А.Л., Сафронов Е.В. (Москва, Россия)

DOI: 10.22281/2413-9920-2025-11-03-312-321

Результаты испытаний прибора для измерения нагруженности приводной
роликовой цепи конвейера для паллет 312

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Мамарозилов У.Д., Суюндилова Г.М. (Ташкент, Узбекистан)

DOI: 10.22281/2413-9920-2025-11-03-322-361

Бельтауский габбро-перидотитовый массив (Западный Тянь-Шань, Узбекистан):
геолого-петрографические особенности, акцессорно-минералогическая и геохимическая
специализация 322

CONTENT

ENGINEERING SCIENCE

**Machinery, ground transportation and technological means and processes**

The articles published in this section comply with the requirements of the List of peer-reviewed scientific publications, in which the main scientific results of dissertations for the degree of Doctor of Science, for the degree of Candidate of Science in the specialties of scientific workers 2.5.2; 2.5.11; 2.5.21

The articles published in this section meet the requirements for journals of category K2 of the List of peer-reviewed scientific publications, in which the main scientific results of dissertations for the degree of Doctor of Science, for the degree of Candidate of Science (Information letter of the Higher Attestation Commission under the Ministry of Education and Science of Russia of December 6, 2022 No. 02-1198)

The articles published in this section meet the requirements for journals of level 3 of the Unified State List of Scientific Publications - the "White List" (Protocol of the Interdepartmental Working Group of July 17, 2025 No. DS/110)

Afanasev M.A., Tyuremnov I.S. (Yaroslavl, Russian Federation)

DOI: 10.22281/2413-9920-2025-11-03-226-238

Analysis of ways to ensure self-propellation of vibratory plate compactors 226

Vlasenko D.A. (Lipetsk, Russian Federation)

DOI: 10.22281/2413-9920-2025-11-03-239-248

Justification of the interroll gap of roll crushers with corrugated working bodies 239

Goncharov K.A. (Moscow, Russian Federation)

DOI: 10.22281/2413-9920-2025-11-03-249-255

Features of application of automation elements processing and analytics of data in traction calculation multi-drive belt conveyor 249

Zakirov R.G. (Chelyabinsk, Russian Federation)

DOI: 10.22281/2413-9920-2025-11-03-256-264

Modeling of dynamic characteristics and analysis of control modes, in rotary vibrodrive with a kinematically unbalanced mass 256

Kazakov O.Y., Saveliev A.G. (Moscow, Russian Federation)

DOI: 10.22281/2413-9920-2025-11-03-265-277

Justification of the direction of rotation of the working body of the combined sealing equipment for asphalt concrete mixtures 265

Korytov M.S., Kashapova I.E., Sherbakov V.S. (Omsk, Russian Federation)

DOI: 10.22281/2413-9920-2025-11-03-278-288

Vibration protection systems for operator seats with two-segment piecewise-linear static force characteristic 278

Sladkova L.A., Borisov I.K. (Moscow, Russian Federation)

DOI: 10.22281/2413-9920-2025-11-03-289-297

Method for determining the parameters of improved outriggers of self-propelled jib cranes 289

Tarichko V.I., Lagerev A.V., Mazlumyan G.S. (Moscow, Russian Federation)

DOI: 10.22281/2413-9920-2025-11-03-298-311

Modeling of the process of time change in quantitative indicators of transmission reliability of multi-axle wheeled chassis at the design stage 298

Fomin N.A., Khlopkov V.P., Nosko A.L., Safronov E.V. (Moscow, Russian Federation)

DOI: 10.22281/2413-9920-2025-11-03-312-321

Assay results of the device for measuring the load of the drive roller chain of the pallet conveyor 312

EARTH SCIENCE

Mamarozikov U.D., Suyundikoiva G.M. (Tashkent, Uzbekistan)

DOI: 10.22281/2413-9920-2025-11-03-322-361

Gabbro-peridotite massif of Beltau (Western Tien-Shan, Uzbekistan): geological and petrographic features, accessory-mineralogical and geochemical specialization 322

УДК (УДК) 625.76.08

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ САМОХОДНОСТИ ВИБРОПЛИТ

ANALYSIS OF WAYS TO ENSURE SELF-PROPELLATION OF VIBRATORY PLATE COMPACTORS

Афанасьев М.А., Тюрёмнов И.С.

Afanasev M.A., Tyuremnov I.S.

Ярославский государственный технический университет (Ярославль, Россия)

Yaroslavl State Technical University (Yaroslavl, Russia)

Аннотация. Самоходные виброплиты – это грунтоуплотняющие машины поверхностного действия, имеющие плоский рабочий орган, который приводится в состояние колебательного движения с помощью вибровозбудителя. Наиболее эффективным способом обеспечения самоходности виброплит является использование энергии колебательного движения самой виброплиты. В последние десятилетия промышленно выпускаются различные варианты конструкций самоходных виброплит, однако существующие исследования затрагивают только две группы виброплит – неререверсивные виброплиты с одновальным вибровозбудителем круговых колебаний и ререверсивные виброплиты с двухвальным вибровозбудителем направленных колебаний. Вместе с тем, увеличение количества дебалансов и/или изменение их расположения друг относительно друга позволяет решать более сложные задачи управления виброплитой, а именно, реализация дистанционного управления, движения в стороны или по дуге, движения вдоль уклона и т.д. Целью исследования являлся сбор и анализ данных о промышленно выпускаемых моделях самоходных виброплит. Установлено, что наибольшее распространение получили неререверсивные виброплиты с одновальным возбудителем круговых колебаний и ререверсивные виброплиты с двухвальным возбудителем круговых колебаний. В то же время, основными тенденциями последних десятилетий являются увеличение количества дебалансных валов и внедрение конструкций, обеспечивающих дистанционное управление виброплитой. Увеличение количества дебалансных валов также позволяет добиться более высоких значений вынуждающей силы.

Ключевые слова: уплотнение грунта, виброплита неререверсивная, виброплита ререверсивная.

Дата получения статьи: 24.09.2024
Дата принятия к публикации: 25.02.2025
Дата публикации: 25.09.2025

Сведения об авторах:

Афанасьев Михаил Александрович – аспирант, ассистент кафедры «Строительные и дорожные машины» ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»,



Abstract. Self-propelled plate compactors are surface-action soil compaction machines with a flat working device set in a state of oscillatory motion by means of a vibration exciter. The most effective way to ensure self-propelled plate compactors is to use the energy of the vibrational motion of the vibratory plate itself. In recent decades, various designs of self-propelled plate compactors have been industrially produced, but existing studies cover only two groups of plate compactors: forward plate compactors with a single-shaft vibration exciter of circular oscillations and reversible plate compactors with a two-shaft vibration exciter of directional oscillations. At the same time, an increase in the number of unbalances and/or a change in their location relative to each other makes it possible to solve more complex problems of vibratory plate control, namely, the implementation of remote control, movement to the sides or along an arc, movement along a slope, etc. The aim of the study was to collect and analyze data on industrially produced models of self-propelled vibratory plates. It was found that the most widely used are forward plate compactors with a single-shaft exciter of circular oscillations and reversible plate compactors with a two-shaft exciter of circular oscillations. At the same time, the main trends of recent decades are an increase in the number of unbalance shafts and the introduction of designs that provide remote control of the vibratory plate. An increase in the number of unbalance shafts also allows achieving higher values of the driving force.

Keywords: soil compaction, vibration, forward plate compactor, reversible plate compactor.

Date of manuscript reception: 24.09.2024
Date of acceptance for publication: 25.02.2025
Date of publication: 25.09.2025

Authors' information:

Mikhail A. Afanasev – postgraduate student, assistant of the Construction and road machines department at Yaroslavl State Technical University, afanasiev.m.a2016@yandex.ru

e-mail: afanasiev.m.a2016@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5059-2557>

Тюремнов Иван Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины» ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», e-mail: tyuremnovis@yandex.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2261-4153>

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5059-2557>

Ivan S. Tyuremnov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Construction and road machines department of Yaroslavl State Technical University, e-mail: tyuremnovis@yandex.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2261-4153>

1. Введение

Уплотнение грунта – технологический процесс, направленный на увеличение плотности и прочности земляных сооружений и оснований путем снижения их пористости. Уплотнение грунта может выполняться с использованием различных типов грунтоуплотняющих машин, к которым относятся грунтовые катки, трамбуемые машины, вибро-трамбовки, самоходные и навесные виброплиты, траншейные виброкатки и т.д. Выбор грунтоуплотняющих машин осуществляется, главным образом, исходя из условий проведения работ.

Самоходные виброплиты – это грунтоуплотняющие машины поверхностного действия, имеющие плоский рабочий орган, который приводится в состояние колебательного движения с помощью вибровозбудителя. Для подавляющего большинства современных моделей виброплит характерен отрывной характер взаимодействия рабочего органа с грунтом.

В отличие от других типов вибрационных грунтоуплотняющих машин (виброкатки, навесные виброплиты), в самоходных виброплитах энергия колебательных движений рабочего органа используется не только для увеличения контактных напряжений на поверхности грунта, но и для передвижения самой машины. Таким образом, обеспечение самоходного передвижения и возможности маневрирования являются важными задачами при проектировании данного типа грунтоуплотняющих машин.

Самоходные виброплиты классифицируют по следующим признакам [1]:

- масса: сверхлегкие (до 100 кг), легкие (100-200 кг), средние (200-500 кг) и тяжелые (свыше 500 кг);
- способ передвижения: нереверсивные и реверсивные;

- способ управления: ручное и дистанционное;
- тип двигателя: бензиновый, дизельный и электрический;
- форма основания: прямоугольное, круглое;
- тип трансмиссии: механическая, гидравлическая.

Самоходные виброплиты используются преимущественно для работы на ровной горизонтальной поверхности. Допустимый угол наклона поверхности ограничивается допустимым углом наклона применяемого двигателя (при использовании двигателя внутреннего сгорания), способностью виброплиты преодолевать уклон, а также ее устойчивостью к опрокидыванию. Для большинства существующих виброплит допустимый угол уклона уплотняемой поверхности составляет от 10 до 20 град.

Ввиду того, что виброплиты применяются на предварительно подготовленных участках без существенных неровностей, удобно рассматривать движение виброплиты в проекции на плоскость грунта. В этом случае, для определения положения виброплиты в любой момент времени достаточно задать координаты X и Y , а также угол поворота φ .

Наличие уклона поверхности приводит к появлению в рассматриваемой плоскости продольной и (или) поперечной составляющей силы тяжести, что негативно сказывается на работе виброплиты. При движении вниз по склону возникает продольная составляющая силы тяжести, сонаправленная с движением виброплиты. В результате, скорость виброплиты увеличивается, что приводит к снижению количества циклов приложения нагрузки к одной точке грунта за один проход. Вследствие этого, для достижения требуемого коэффициента уплотнения тре-

буется большее количество проходов по одному следу.

При движении вверх по склону, количество циклов приложения нагрузки к одной точке грунта за один проход увеличивается, что снижает производительность и приводит к увеличению призмы волочения, из-за чего дополнительно повышается сопротивление передвижению (это связано с тем, что призма волочения создает дополнительный преодолеваемый уклон). При дальнейшем увеличении угла наклона, движущая сила вибровозбудителя уравнивается силами сопротивления перемещению, и дальнейшее движение становится невозможным.

При движении поперек уклона (рис. 1) в плоскости XU возникает поперечная составляющая силы тяжести F_y^T . Для ее компенсации требуется сообщить виброплите силу, равную по величине и противоположную по направлению поперечной составляющей силы тяжести F_y^T . В отсутствие у большинства моделей виброплит возможности генерации поперечных движущих сил, поперечная составляющая силы тяжести может быть скомпенсирована поворотом виброплиты в плоскости XU на некоторый угол φ , который зависит от угла наклона поверхности, массы виброплиты, величины вынуждающей силы, а также типа виброплиты (поскольку характер взаимодействия реверсивных и неревверсивных плит с грунтом несколько различается). В результате, поперечная составляющая силы тяжести F_y^T будет скомпенсирована проекцией F_y^B движущей силы F^B на ось Y . Однако, при повороте виброплиты, основание также окажется развернуто относительно направления движения виброплиты. В результате, количество циклов приложения нагрузки к одной точке грунта за один проход будет распределяться по ширине следа неравномерно, что негативно скажется на результате уплотнения грунта.

Стоит отметить, что поскольку у большинства моделей виброплит длина основания равна или превышает его ширину движение вдоль склона (вверх или вниз) предпочтительно, так как это снижает риск опрокидывания. Однако из условия обеспечения равномерной скорости движения виб-

роплиты от прохода к проходу, желательно движение виброплиты именно поперек уклона, но без увода ее в сторону.

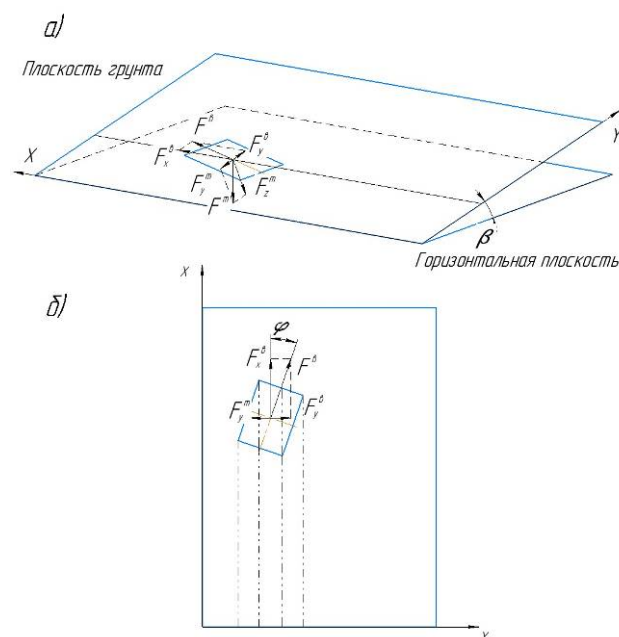


Рис. 1. Движение виброплиты поперек уклона: а – геометрия участка выполнения работ; б – увод виброплиты в сторону под действием силы тяжести

Существующие исследования по теме виброплит направлены на повышение вибрационной защиты органов управления [2], оценку влияния вибрации на близлежащие сооружения и подземные коммуникации [3-5], повышение производительности виброплит [6-7], совершенствование методик моделирования [8-9] и проектирования виброплит [10-11] и др. Важным направлением развития грунтоуплотняющих машин в целом является внедрение систем «интеллектуального уплотнения» [12-13].

Существует ряд исследований, в которых описываются конструкции и условия обеспечения самоходности виброплит [14-17]. Однако все эти исследования сосредоточены на двух наиболее распространенных типах виброплит – неревверсивных с одновальным возбудителем круговых колебаний и реверсивных с двухвальным вибровозбудителем направленных колебаний. Вместе с тем, в последние десятилетия появился целый ряд конструкций виброплит, которые до сих пор не были подробно освещены в научной ли-

температуре. В частности, это виброплиты с дистанционным управлением, которые используют энергию колебаний не только для прямолинейного движения (в том числе реверсивного), но и для изменения направления движения (поворот, движение по дуге, боковое движение), т.е. маневрирования.

Целью данного исследования являлся сбор и систематизация данных о существующих и перспективных конструкциях виброплит, способов обеспечения их самоходного передвижения и маневрирования. На основе собранных данных проведен анализ основных тенденций в области производства виброплит, а также предложены направления дальнейшего совершенствования конструкций данного типа грунтоуплотняющих машин.

2. Материалы и методы

В ходе исследования были проанализированы конструкции и технические характеристики 1137 моделей виброплит основных отечественных марок (Красный маяк, Вибромаш, Техком, Сплитстоун и др.) и зарубежных марок (BOMAG, Mikasa, ALTECO, AMMANN, Belle, Helmut, Husqvarna, Diam, Batmatic, Dynapac, Euro Shatal, Foxweld и др.). Всего рассмотрено 67 торговых марок виброплит, произведенных в России, Белоруссии, КНР, Японии, Южной Корее, Чехии, Швейцарии, Германии, Израиле, США, Франции, Великобритании, Испании, Италии и Швеции.

Анализ выполнен на основе данных, предоставленных на официальных сайтах производителей виброплит, а также на сайтах их дилеров. Кроме того, были рассмотрены патенты и научные исследования, касающиеся вопросов обеспечения самоходности и маневренности виброплит.

3. Результаты

Самоходность вибрационных машин (и виброплит в частности) достигается, главным образом, за счет наличия того или иного вида асимметрии системы. Известны конструкции виброплит, в которых асиммет-

рия достигается за счет приложения к виброплите внешней силы. В работе [18] рассматривается испытательная установка для оценки влияния скорости передвижения виброплиты на результат уплотнения грунта, где передвижение виброплиты осуществляется при помощи лебедки. Однако, на практике виброплиты с лебедочным приводом не нашли широкого применения.

Наиболее эффективный способ обеспечения самоходности виброплит - использование энергии колебательного движения самой виброплиты. Для этого могут применяться вибровозбудители ненаправленного или направленного действия. Цикл передвижения виброплиты с вибровозбудителем ненаправленного действия приведен на рис. 2. Здесь F_d – движущая сила виброплиты в обратном направлении; F_p – сила реакции грунта, ограничивающая движение виброплиты в обратном направлении; F_m и F_p – вес рамы и сила реакции грунта, ограничивающие амплитуду опорной плиты в вертикальной плоскости; P – вынуждающая сила.

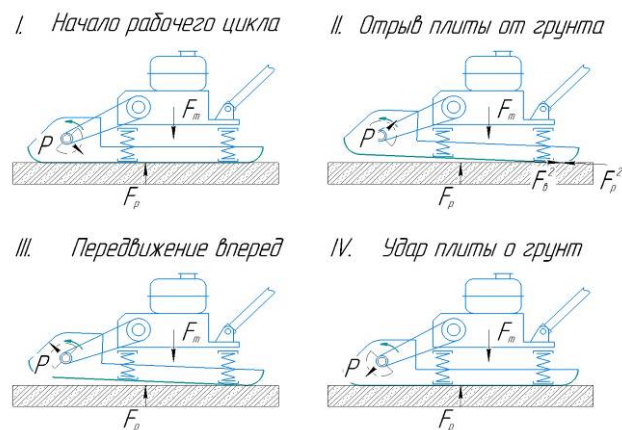


Рис. 2. Цикл передвижения нереверсивной виброплиты

Упрощенно цикл передвижения нереверсивной виброплиты можно представить состоящим из 4 этапов:

1. В первую четверть оборота дебалансного вала (рис. 2) виброплита прижимается к поверхности уплотняемого грунта под действием вертикальной составляющей вынуждающей силы, за счет чего сопротивление перемещению на данном этапе максимально. Поэтому, несмотря на наличие гори-

зонтальной составляющей вынуждающей силы, виброплита остается на месте.

2. В течение второй четверти оборота опорная плита начинает отрываться от грунта. На этом этапе также присутствует горизонтальная составляющая вынуждающей силы, направленная противоположно движению виброплиты. Однако, поскольку вибровозбудитель смещен вперед относительно центра масс виброплиты, задняя кромка сохраняет контакт с грунтом и выступает в качестве мгновенной оси вращения. В результате виброплита «упирается» в грунт задней кромкой, и сила реакции грунта частично компенсирует горизонтальную составляющую вынуждающей силы, ограничивая движение плиты в обратном направлении.

3. В третьей четверти оборота направление горизонтальной составляющей вынуждающей силы совпадает с направлением движения виброплиты. Поскольку передняя кромка опорной плиты к этому времени оторвана от поверхности грунта сопротивление перемещению в прямом направлении минимально и виброплита движется вперед.

4. На четвертом этапе происходит удар опорной плиты о грунт, что обеспечивает его уплотнение.

Принцип передвижения реальной виброплиты несколько сложнее, поскольку на современных виброплитах наблюдаются довольно высокие значения относительной вынуждающей силы и частоты колебаний вибровозбудителя [19]. В результате за один цикл отрыва опорной плиты от грунта дебалансный вал может совершать 2, 3 и более оборота.

Движение опорной плиты в вертикальной плоскости ограничено снизу – поверхностью грунта, сверху – массой рамы с двигателем. Жесткость демпфера, связывающего верхнюю и нижнюю массу, обычно выбирается таким образом, чтобы при рабочей частоте колебаний вибровозбудителя отсутствовал резонанс.

Исследования [20] показывают, что самоходность виброплит, оснащенных одновальным возбудителем круговых колебаний, может достигаться и при расположении вибро-

возбудителя вблизи центра тяжести виброплиты. Для этого валу вибровозбудителя требуется задать обратное направление вращения (то есть такое, при котором в нижней точке своего вращения дебаланс будет двигаться противоположно направлению движения виброплиты), в результате чего основание виброплиты также будет стремиться занять наклонное положение, при котором обеспечиваются условия для самоходного передвижения виброплиты (а именно, разница в сопротивлении передвижению в прямом и обратном направлении). Тем не менее, подобные конструкции не нашли широкого применения в промышленно выпускаемых виброплитах.

Известен вариант конструкции виброплиты, в котором круговые колебания одновального вибровозбудителя ненаправленного действия преобразуются в направленные колебания [21]. Для этого вибровозбудитель устанавливается на опорную плиту с использованием передающего устройства, которое имеет различную жесткость в различных направлениях движения (рис. 3, а). Это позволяет улучшить ходовые качества виброплиты с использованием более дешевого одновального вибровозбудителя. Однако, насколько удалось установить, такая конструкция не нашла применения на практике.

Более широкие возможности для управления виброплитой достигаются при использовании двухвального вибровозбудителя направленных колебаний. В частности, появляется возможность реверсирования направления движения виброплиты, а также изменения ее скорости.

Наиболее ранние известные модели виброплит с вибрационным способом передвижения оснащались двухвальным вибровозбудителем направленных колебаний, установленным в центральной части опорной плиты посредством поворотного шарнира [20]. Использование шарнира позволяет передавать колебания, возникающие при вращении эксцентриков, на опорную плиту. При этом, при повороте блока дебалансов появляется возможность изменения направления равнодействующей вынуждающей силы, что обеспечивает условия для самоход-

ного передвижения виброплиты с возможностью реверса хода (рис. 3, б).

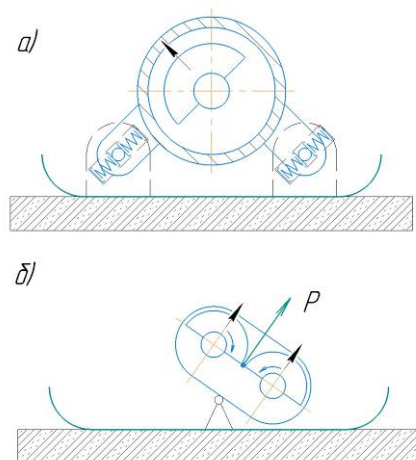


Рис. 3. Конструкция виброплиты:

а - виброплита с одновальным вибровозбудителем направленного действия; б - виброплита с двухвальным возбудителем направленного действия, установленным на поворотном шарнире

Данная конструкция имеет очевидные недостатки, такие как неиспользуемое пространство, необходимое для поворота блока дебалансов, а также сложность в передаче крутящего момента от двигателя на дебалансный вал (поскольку межосевое расстояние между валом двигателя и дебалансным валом изменяется при повороте блока дебалансов). Поэтому в настоящее время такая конструкция не встречается в промышленно выпускаемых виброплитах.

В современных реверсивных виброплитах, оснащенных двухвальным вибровозбудителем, реверсирование обеспечивается путем смещения фаз колебаний дебалансов друг относительно друга (рис. 4, а). Как правило, начальный угол сдвига фаз составляет 60...90 град при прямом и 240...270 град при реверсивном движении. В результате, вектор суммарной вынуждающей силы всего вибровозбудителя находится в пределах $\pm 30...45$ град относительно нормали к основанию виброплиты. Горизонтальная составляющая этого вектора обеспечивает самоходное передвижение виброплиты.

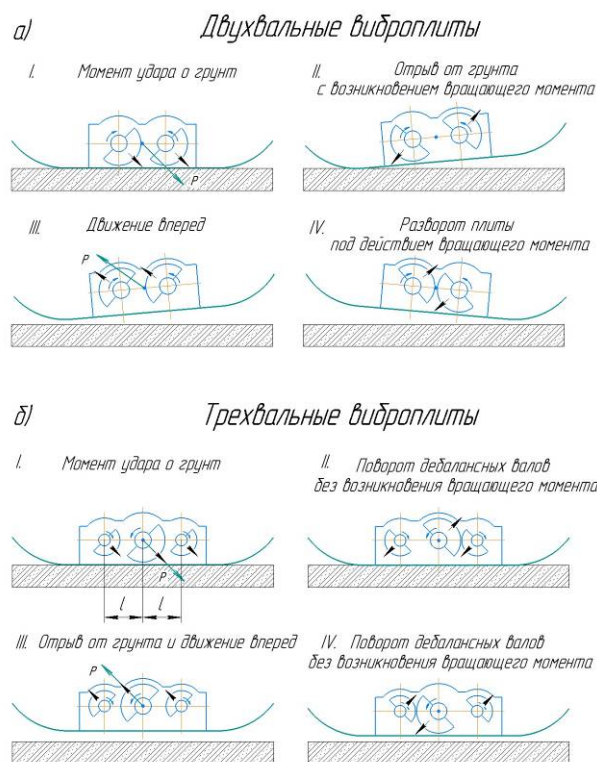


Рис. 4. Особенности передвижения реверсивных виброплит: а - двухвальные виброплиты; б - трехвальные виброплиты (Р - вынуждающая сила вибровозбудителя; l - расстояние между дебалансными валами)

Более совершенная конструкция реверсивной виброплиты разработана компанией AMMANN. В данном случае вместо двух дебалансов с соотношением статических моментов $\frac{1}{2} : \frac{1}{2}$ используется 3 дебаланса с соотношением статических моментов в пропорции $\frac{1}{4} : \frac{1}{2} : \frac{1}{4}$ (рис. 4, б). В отличие от двухвального вибровозбудителя, который помимо вынуждающей силы сообщает виброплите вращающий момент, приводящий к ее раскачиванию, трехвальный вибровозбудитель обеспечивает плоскопараллельное движения основания виброплиты и более равномерное распределение контактных напряжений по поверхности грунта (рис. 4).

Следующей задачей обеспечения самоходности виброплит является их маневрирование, то есть изменение углового положения виброплиты в горизонтальной плоскости (рис. 1). Способ маневрирования зависит от того, имеет ли виброплита ручное или дистанционное управление.

В случае с ручным управлением, поворот виброплиты осуществляется оператором путем приложения к рукоятки поперечной силы, которая создает вращающий момент относительно центра масс системы. На большинстве моделей виброплит рукоятка обладает значительной длиной и вынесена в заднюю часть, что обеспечивает поворот виброплиты при меньших значениях прикладываемой к рукоятки силы. На виброплитах с круглым основанием рукоятка располагается прямо над основанием и повторяет его контур, что обеспечивает более предсказуемое управление угловым положением виброплиты при работе вблизи различных препятствий.

При использовании систем дистанционного управления, поворот виброплиты осуществляется за счет вращающего момента, создаваемого вибровозбудителем. Существует несколько способов генерации данного вращающего момента.

Наибольшее распространение получила конструкция с использованием двухвального вибровозбудителя (подобная конструкция используется на виброплитах Wacker Neuson DPU110r). В этом случае один из валов является основным и содержит 1 дебаланс со статическим моментом, равным $\frac{1}{2}$ от суммарного статического момента вибровозбудителя $M_{\text{сум}}$. Второй вал является управляющим и содержит 2 дебаланса, смещенных относительно продольной оси виброплиты, со статическими моментами, равными $0,5M_{\text{сум}}$. Основной и управляющий валы вращаются в противоположные стороны, что позволяет задавать прямое или реверсивное движение путем одновременного смещения фаз колебаний дебалансов управляющего вала относительно фазы колебаний основного вала (рис. 5, а). Для поворота дебалансы управляющего вала смещаются как относительно основного вала, так и друг относительно друга, что приводит к появлению в горизонтальной плоскости вращающего момента (рис. 5, б-в). Привод вибровозбудителя, а также привод механизма смещения фаз колебаний дебалансов управляющего вала осуществляется гидравлически.

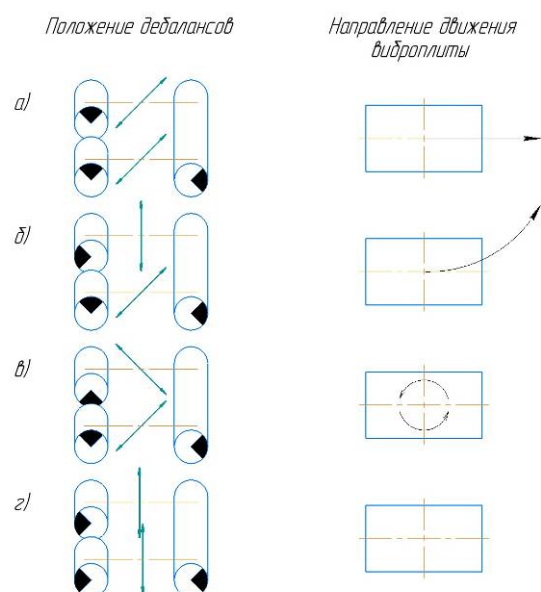


Рис. 5. Способы передвижения виброплиты с использованием трех дебалансов:

а – прямолинейное движение; б – движение по дуге; в – разворот на месте; г – вибрация на месте

Существует альтернативный способ изменения углового положения виброплит с дистанционным управлением. В данном случае опорная плита состоит из двух частей, каждая из которых содержит по одному двухвальному вибровозбудителю (рис. 6, а). Принцип управления такой виброплитой основан на изменении горизонтальной составляющей вынуждающей силы каждого вибровозбудителя. Для прямого или реверсивного движения эта составляющая направляется вперед или назад соответственно. При повороте, горизонтальная проекция вынуждающей силы одного из вибровозбудителей (находящегося на внешнем радиусе) оказывается выше, чем второго (находящегося на внутреннем радиусе). Поскольку вибровозбудители смещены относительно продольной оси виброплиты, разница в горизонтальной составляющей вынуждающей силы создает относительно центра масс виброплиты вращающий момент, который поворачивает виброплиту. Подобный механизм передвижения используется в виброплите Wacker Neuson DPU 130r.

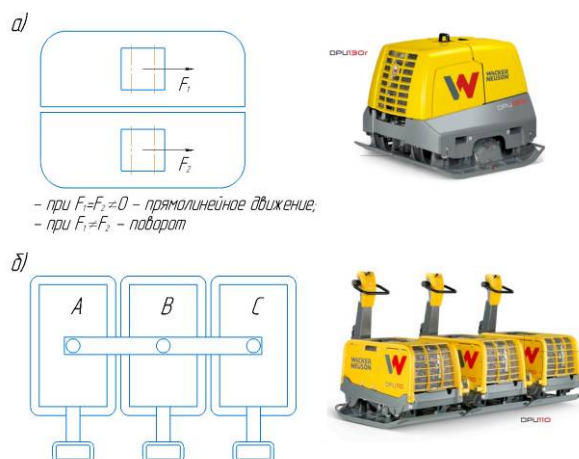


Рис. 6. Способ реализации вращательного движения виброплиты с использованием нескольких вибровозбудителей направленного действия: а – виброплита с двумя опорными плитами б – модульная машина из трех реверсивных виброплит [22]

Аналогичный принцип управления применяется при совместном использовании нескольких (двух, трех и более) виброплит, объединенных в один блок (рис. 6, б). В этом случае виброплиты соединяются между собой механически, а также посредством управляющего передатчика. Законы управления движением такой виброплитой приведены в табл. 1. Символы обозначают сигнал управления для каждой из трех виброплит:

- «+» - движение вперед;
- «-» - движение назад;
- «0» - работа на месте.

Таблица 1

Способ управления модульной грунтоуплотняющей машиной, состоящей из трех реверсивных виброплит

	Сигнал управления				
	Налево	Вперед	На-право	Назад	На месте
A	-	+	+	-	0
B	0	+	0	-	0
C	+	+	-	-	0

Примером такой конструкции является «coupling set» от компании Wacker Neuson (рис. 6), позволяющий объединить 3 виброплиты DPU110 в единый блок, управляемый оператором дистанционно. В результате ширина полосы уплотнения увеличивается до 3

м, суммарная величина вынуждающей силы достигает 330 кН, а масса составляет 2616 кг.

Недостатком описанных выше конструкций является ограниченная маневренность, поскольку они не обеспечивают возможности бокового движения, что могло бы быть полезно в условиях узких траншей. Исправить данную проблему можно путем изменения положения дебалансных валов на опорной плите.

Существует конструкция виброплиты с дистанционным управления, содержащая 4 дебалансных вала, установленных по углам опорной плиты под углом 90 град друг относительно друга и вращающихся с одинаковой угловой скоростью (рис. 7). Направления вращения дебалансных валов (на рис. 7 обозначены зеленым цветом) задаются таким образом, чтобы каждая пара дебалансных валов вращалась в противоположные направления. При этом один из дебалансов (обозначен на Рис. 7 красным цветом) является основным и не имеет механизма изменения фазы колебаний, тогда как 3 других (обозначены на рис. 7 желтым цветом) являются управляющими и оснащены механизмом изменения фазы колебаний. В случае, когда фазы колебаний всех дебалансов совпадают (рис. 7, б), суммарная вынуждающая сила имеет только вертикальную составляющую (горизонтальные составляющие взаимокompенсируются), за счет чего виброплита работает на месте. При смещении фазы колебаний двух диагонально расположенных дебалансов (2 и 4) на 90 град (рис. 7, в) возникает вращающий момент, который поворачивает виброплиту. Для прямолинейного движения (рис. 7, г) фаза колебаний двух передних (2 и 3) и двух задних (1 и 4) дебалансов должны совпадать между собой, а фазы колебаний двух правых (1 и 2) и двух левых (3 и 4) дебалансов должны различаться на одинаковый угол. Изменение фаз колебаний дебалансов позволяет задавать прямолинейное движение в прямом, реверсивном и боковом направлениях.

Существует рабочий прототип четырехвальной виброплиты AMMANN eAPX 68/95, однако до сих пор отсутствуют промышлен-

но выпускаемые образцы данного типа виброплит.

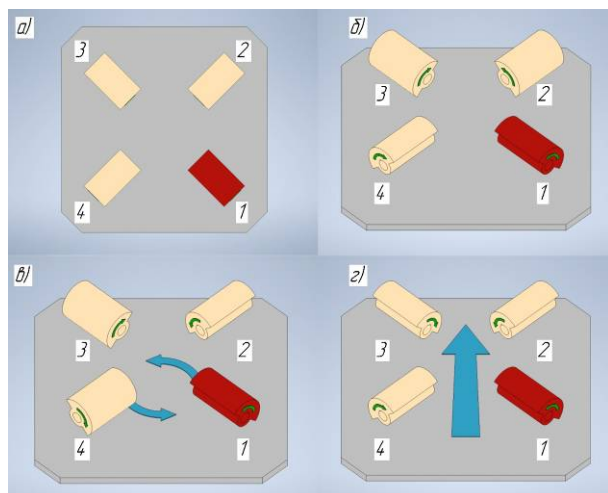


Рис. 7. Механизм передвижения четыреххвальной виброплиты с угловым расположением дебалансных валов: а – общая схема; б – работа на месте; в – разворот на месте; г – прямолинейное движение.

В описанной конструкции дебалансные валы расположены симметрично относительно основания, имеют одинаковую массу и попарно соосны между собой. В патенте, принадлежащем компании Wacker Neuson [23], предлагаются различные модификации данной конструкции. Например, путем нарушения соосности диагонально установленных дебалансов можно добиться одновременной генерации как продольной, так и поперечной составляющей вынуждающей силы, что позволит использовать виброплиту для работы на поперечных уклонах без увода ее в сторону. Также предлагается расположить дебалансные валы под углами, не равными 90 град, или использовать дебалансы различной массы, что позволит задать приоритетные направления движения виброплиты. Однако подобные конструкции до сих пор не нашли широкого применения.

Следует отметить, что увеличение числа дебалансных валов позволяет достигать более высоких значений вынуждающей силы, что требуется при эксплуатации средних и тяжелых виброплит (рис. 8). При этом для всех типов виброплит наблюдается схожий характер зависимости вынуждающей силы

от массы. Диапазоны изменения основных параметров для различных типов виброплит приведены в табл. 2.

4. Обсуждение

В течение последних десятилетий у производителей сформировалось представление об области применения основных типов грунтоуплотняющих машин. Так, в середине XX века существовали виброплиты массой более 1000 кг, что с учетом сложности обеспечения высоких значений относительной вынуждающей силы требовало применения дополнительных элементов конструкции, обеспечивающих самоходное передвижение виброплиты. При этом высокая масса и большие габариты виброплит ставили их в один ряд с другими грунтоуплотняющими машинами (трамбуемые машины и катки).

Масса большинства современных виброплит не превышает 830 кг, что связано с разделением области использования самоходных виброплит и более тяжелых видов грунтоуплотняющих машин – в первую очередь, грунтовых катков. Первые используются в качестве мобильного оборудования, которое можно легко перевозить между площадками и использовать в ограниченном пространстве. Вторые обеспечивают высокую производительность на крупных строительных площадках. Для повышения производительности могут применяться модульные системы, объединяющие 2 и более виброплит в единый блок.

Механический привод передвижения вибрационных плит (лебедка, шагающий ход и т.д.) в настоящее время не применяется, поскольку он вытеснен другими, более совершенными вариантами конструкции.

В последние годы заметно выросло количество конструкций виброплит, обеспечивающих возможность применения на них системы дистанционного управления. Это позволяет полностью решить вопрос вибрационной безопасности оборудования, поскольку органы управления виброплиты, с которыми контактирует оператор, оказываются

изолированы от вибровозбудителя. Кроме того, система дистанционного управ-

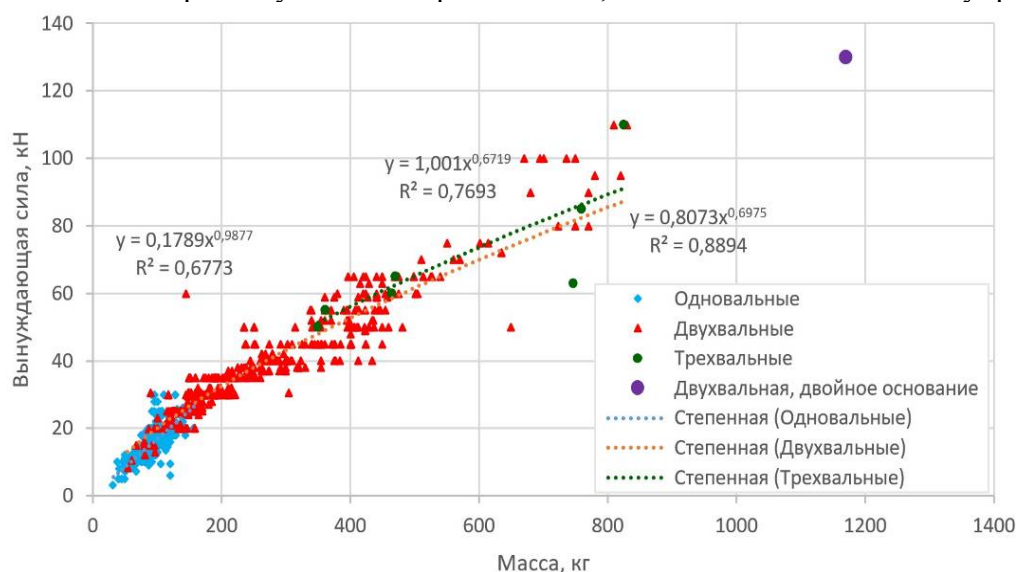


Рис. 8. Взаимосвязь массы и вынуждающей силы виброплит с конструкцией вибровозбудителя

Таблица 2

Диапазоны изменения параметров различных типов виброплит

Параметр	Тип виброплиты			
	Одновальные	Двухвальные	Трехвальные	Двухвальные, двойное основание
Масса плиты М, кг	32...1170			
	32...160	54...830	350...825	1170
Вынуждающая сила Р, кН	3,25...130			
	3,25...30	8,2...110	50...110	130
Частота колебаний f, Гц	30,5...126			
	47,5...126	30,5...117	46...70	58
Мощность двигателя N, кВт	0,25...21			
	0,25...6,3	1,8...17	7...17,5	21
Относительная вынуждающая сила P/Q	5,1...42,18			
	5,1...33,24	7,66...42,18	8,6...15,49	11,33

ления обеспечивает безопасную работу виброплиты в траншеях.

Как можно увидеть из анализа конструкций, в последние годы важными направлениями развития виброплит являются обеспечение более равномерного распределения контактных напряжений по опорной поверхности, а также повышение маневренности. Обе задачи в представленных конструкциях решаются увеличением количества дебалансных валов.

Вместе с тем, плохо изученным остается вопрос использования самоходных вибро-

плит на уклонах. Отсутствует информация о том, как меняется уплотняющая способность виброплиты при движении на продольных и поперечных уклонах. Также отсутствуют исследования, касающиеся рационального выбора соотношения массы опорной плиты и рамы виброплиты.

Количество дебалансных валов не влияет на характер зависимости вынуждающей силы от массы. Тем не менее, большее количество дебалансных валов позволяет увеличить значение вынуждающей силы, что требуется

на виброплитах с высокой массой и большой площадью основания.

Наблюдается общая тенденция по увеличению количества дебалансных валов (в том числе, с возможностью смещения фазы колебаний друг относительно друга) среди промышленно выпускаемых моделей самоходных виброплит.

5. Заключение

Собранные данные позволяют выделить основные типы конструкций виброплит с точки зрения способа обеспечения их самоходности. Наибольшее распространение получили нереверсивные виброплиты с одновальным возбудителем круговых колебаний и реверсивные виброплиты с двухвальным вибровозбудителем направленного действия, которые уже успели доказать свою эффективность.

Для тяжелых виброплит характерна большая площадь основания. Чтобы сохранить высокие значения контактных напряжений на таких виброплитах, требуется увеличить вынуждающую силу. В ряде случаев

целесообразно использовать для этого несколько дебалансных валов, что позволит также обеспечить более равномерное распределение контактных напряжений.

Разнообразие конструкций виброплит с дистанционным управлением может указывать на то, что у производителей до сих пор не сложилось единого мнения об оптимальной компоновке виброплиты с дистанционным управлением. Сравнение различных конструкций с точки зрения энергоэффективности, производительности и уплотняющей способности может стать темой для дальнейших исследований.

Особый интерес представляет задача рационального выбора соотношения массы основания и рамы виброплит. Как видно из рис. 2, рама выступает ограничителем при движении основания к верхней мертвой точке. Повышение массы рамы, до определенного предела, может положительно влиять на самоходные свойства и уплотняющую способность виброплит за счет снижения времени отрыва основания от грунта. Данный вопрос также может стать темой для дальнейших исследований.

Список литературы

1. Тюремнов И.С., Новичихин А.А. Уплотнение грунтов вибрационными плитами. Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2018, 143 с.
2. Кузьмичев В.Д. Математическая модель виброплиты // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 3. С. 65-68.
3. Czech K., Gosk W. Impact of the Operation of a Tri-band Hydraulic Compactor on the Technical Condition of a Residential Building // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. No. 2. DOI: 10.3390/app9020336.
4. Wang C., Qiu T., Xiao M., Wang J. Utility Trench Backfill Compaction Using Vibratory Plate Compactor versus Excavator-Mounted Hydraulic Plate Compactor // Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice. 2017. Vol. 8. No. 4. DOI: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000284.
5. Czech K., Gosk W. The Impact of

References

1. Tyuremnov I.S., Novichikhin A.A. *Uplotnenie gruntov vibratsionnymi plitami* [Soil compaction using vibratory plate compactors]. Yaroslavl, Izdat. dom YSTU, 2018, 143 p. (In Russian).
2. Kuzmichev V. . Mathematical model of plate compactors. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie*. 2012, No. 3, pp. 65-68. (In Russian).
3. Czech K., Gosk W. Impact of the Operation of a Tri-band Hydraulic Compactor on the Technical Condition of a Residential Building. *Applied Sciences*, 2019, Vol. 9, No. 2. DOI: 10.3390/app9020336.
4. Wang C., Qiu T., Xiao M., Wang J. Utility Trench Backfill Compaction Using Vibratory Plate Compactor versus Excavator-Mounted Hydraulic Plate Compactor. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2017, Vol. 8, No. 4. DOI: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000284.

Work of Hydraulic Compactor Type V8 from MTS on the Level of Vibrations Propagated to the Environment // *Procedia Engineering*. 2017. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.077.

6. Massarsch K.R., Wersäll, C. Vibratory plate resonance compaction // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*. 2019. P. 127-130. DOI: 10.1680/jgeen.19.00169.

7. Кузьмичев, В. Д. Разработка динамической модели самоходной нереверсивной виброплиты // *Механика XXI века*. 2012. № 11. С. 39-45.

8. Тюремнов И. С., Ефимов С.С. Моделирование взаимодействия виброплиты с поверхностью грунта // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2022. № 4. С. 30-41. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.4.04.

9. Евсеев Е. Ю., Матвеев В.Н., Зубков А.Ф. Моделирование процесса взаимодействия вибродвижной плиты с горячей асфальтобетонной смесью при ремонте // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура*. 2012. № 4. С. 70-77.

10. Кузьмичев В. А., Кузьмичев В.Д. Методика расчета гидравлического механизма реверса самоходных виброплит // *Системы. Методы. Технологии*. 2012. № 1. С. 53-57.

11. Morariu-Gligor R.M., Crisan A.V., Serdean F.M. Optimal design of a one-way plate compactor // *Acta Technica Napocensis. Series: Applied Mathematics and Mechanics*. 2017. Vol. 60. No 4. pp. 557–564.

12. Anderegg R., Kaufmann K. Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors // *GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*. 2006. DOI: 10.1061/40803(187)41.

13. Kwaśniewski A., Maciejewski J., Bąk S. Monitoring soil state during compaction process using a vibrating rammer and a plate compactor // *Journal of Terramechanics*. 2022. Vol. 100. pp. 61-72. DOI: 10.1016/j.jterra.2022.01.002.

14. Башкарев А.Я., Мусияко Д.В., Расу-

5. Czech K., Gosk W. The Impact of Work of Hydraulic Compactor Type V8 from MTS on the Level of Vibrations Propagated to the Environment. *Procedia Engineering*, 2017. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.077.

6. Massarsch K.R., Wersäll C. Vibratory plate resonance compaction. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 2019, pp. 127-130. doi: 10.1680/jgeen.19.00169.

7. Kuzmichev V.D. Development of a dynamic model of forward plate compactor. *Mekhanika XXI veku*, 2012, No. 11, pp. 39-45. (In Russian).

8. Tyuremnov I.S., Efimov S.S. Modeling the interaction of a plate compactor with the soil surface. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2022, No. 4, pp. 30-41. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.4.04. (In Russian).

9. Evseev E.Yu., Matveev V.N., Zubkov A.F. Modeling the interaction process of a plate compactor with hot asphalt concrete mixture during road surface repair. *Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2012, No. 4, pp. 70-77. (In Russian).

10. Kuzmichev V.A., Kuzmichev V.D. Methodology for calculating the hydraulic mechanism of the reverse of plate compactors *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2012, No. 1, pp. 53-57. (In Russian).

11. Morariu-Gligor R.M., Crisan A.V., Serdean F.M. Optimal design of a one-way plate compactor. *Acta Technica Napocensis. Series: Applied Mathematics and Mechanics*, 2017, Vol 60, No. 4. pp. 557–564.

12. Anderegg R., Kaufmann K. Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors. *GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*. 2006. doi: 10.1061/40803(187)41.

13. Kwaśniewski A., Maciejewski J., Bąk S. Monitoring soil state during compaction process using a vibrating rammer and a plate compactor. *Journal of Terramechanics*, Vol. 100, pp. 61-72. DOI: 10.1016/j.jterra.2022.01.002.

14. Bashkarev A.Ya., Musiyako D.V., Rac-

лов Р.А. Компоновка самоходных вибрационных уплотнителей // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2015. № 4. С. 163-169. DOI: 10.5862/JEST.231.17.

15. Башкарев А.Я., Мусияко Д.В., Пешков В.С. Вибрационное перемещение поверхностного уплотнителя // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. № 1. С. 175-178.

16. Мусияко Д.В., Расулов Р.А. Самоходная вибрационная плита с вальцем // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2016. № 4. С. 73-80.

17. Кузьмичев В.А., Кузьмичев В.Д. Исследование рабочих параметров самоходных виброплит, применяемых при уплотнении грунтов // Вестник гражданских инженеров. 2011. № 3. С. 66-71.

18. Попов Г.Н., Шестопалов А.А. К вопросу о выборе рациональной скорости движения вибрационных грунтоуплотняющих машин. // Труды ЛПИ. 1970. № 314. С. 105-109.

19. Афанасьев М.А., Тюремнов И.С. Статистический анализ технических характеристик самоходных неререверсивных виброплит с различными типами двигателей // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2024. Т. 21, № 4. С. 488-501. DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-4-488-501.

20. Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. Москва: Транспорт, 1975, 288 с.

21. Oscillation exciter / M. Awrath. - U.S. Patent No. 8,256,987. Appl. 25.03.2010. No. 12/439,867. Date of Patent: 04.09.2012.

22. Wacker Neuson [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.wackerneuson.com> (дата обращения 12.07.2024).

23. Vibrating plate with unbalanced shafts arranged at an angle / O.W. Stenzel - U.S. Patent No. 8,721,218. Appl. 19.04.2010. No. 11/993,131. Date of Patent: 13.05.2014.

ulov R.A. Layout of self-propelled vibratory compactors. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*, 2015, № 4, pp. 163-169. DOI: 10.5862/JEST.231.17. (In Russian).

15. Bashkarev A.Ya., Musiyako D.V., Peshkov V.S. Vibratory movement of the surface compactor. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*, 2013, No. 1, pp. 175-178. (In Russian).

16. Musiyako D.V., Rasulov R.A. Self-propelled plate compactor with a roller. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, No. 4, pp. 73-80. (In Russian).

17. Kuzmichev V.A., Kuzmichev V.D. Study of the operating parameters of self-propelled plate compactors used for soil compaction. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2011, No. 3, pp. 66-71. (In Russian).

18. Popov G.N., Shestopalov A.A. On the issue of choosing a rational speed of movement of vibratory soil compaction machines. *Trudy LPI*, 1970, No. 314, pp. 105-109. (In Russian).

19. Afanasev M.A., Tyuremnov I.S. Statistical analysis of technical specifications for non-reversible plate vibrators with different types of engines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2024, Vol. 21, No. 4, pp. 488-501. DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-4-488-501. (In Russian).

20. Kharkhuta N.Ya., Vasilev Yu.M. *Strength, stability and compaction of roadbed soils*. Moscow, Transport, 1975, 288 p. (In Russian)

21. Patent US 8,256,987. *Oscillation exciter*. Awrath M. Declared 25.03.2010. Published 04.09.2012.

22. Wacker Neuson. Available at: <https://www.wackerneuson.com>.

23. Patent US 8,721,218. *Vibrating plate with unbalanced shafts arranged at an angle*. Stenzel O.W. Declared 19.04.2010. Published 13.05.2014.

УДК (UDC) 621.926.9

ОБОСНОВАНИЕ МЕЖВАЛКОВОГО ЗАЗОРА ВАЛКОВЫХ ДРОБИЛОК С
РИФЛЕННЫМИ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИJUSTIFICATION OF THE INTERROLL GAP OF ROLL CRUSHERS WITH
CORRUGATED WORKING BODIESВласенко Д.А.
Vlasenko D.A.Липецкий государственный технический университет (Липецк, Россия)
Lipetsk State Technical University (Lipetsk, Russian Federation)

Аннотация. Качество фракционной подготовки твердого топлива, реализуемой в агломерационном производстве с помощью валковых дробилок, зависит от множества факторов, одним из которых является обеспечение необходимого межвалкового зазора в процессе дробления материала, для обоснования которого разработана математическая модель валковой дробилки с рифлеными валками. Предложены формулы для определения сил, действующих на рабочую поверхность рифленого вала в процессе дробления материала, на основании которых получена зависимость предварительной затяжки комплекта пружин амортизационного устройства валковой дробильной машины для обеспечения требуемого зазора в процессе дробления. Согласно технологическим требованиям процесса спекания агломерата даны рекомендации по предварительной регулировке амортизационного устройства верхних рифленых валков четырехвалковой дробилки ДЧГ 900×700, применяемой в агломерационном цехе ООО «ЮГМК» для фракционной подготовки кокса доменного и кокса сухого тушения. По результатам предварительных испытаний в процессе фракционной подготовки твердого топлива в дробилке ДЧГ 900×700 с использованием рекомендованных режимных параметров по регулированию межвалкового зазора установлено, что содержание нежелательных мелких –0,5 мм и крупных +3,0 мм фракций в готовом продукте снизилось на 6,5% и 4,5% соответственно.

Ключевые слова: агломерационное производство, твердое топливо, валковые дробилки, рифленые валки, межвалковый зазор

Дата получения статьи: 06.08.2025
Дата принятия к публикации: 08.09.2000
Дата публикации: 25.09.2025

Сведения об авторе:

Власенко Дмитрий Алексеевич – кандидат технических наук, соискатель ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»,
e-mail: vlsnkda@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-6829-061X.

Abstract. The quality of fractional preparation of solid fuel, implemented in agglomeration production using roller crushers, depends on many factors, one of which is ensuring the required inter-roller gap in the process of crushing the material, for the substantiation of which a mathematical model of a roller crusher with corrugated rolls has been developed. Formulas are proposed for determining the forces acting on the working surface of the corrugated roll in the process of crushing the material, on the basis of which a dependence is obtained for the preliminary tightening of the spring set of the shock-absorbing device of the roller crushing machine to ensure the required gap in the crushing process. According to the technological requirements of the agglomerate sintering process, recommendations are given for preliminary adjustment of the shock-absorbing device of the upper corrugated rolls of the four-roll crusher CFS 900×700, used in the agglomeration shop of LLC «SMMC» for fractional preparation of blast-furnace coke and dry-quenching coke. According to the results of preliminary tests in the process of fractional preparation of solid fuel in the crusher CFS 900×700 using the recommended operating parameters for adjusting the inter-roll gap, it was found that the content of undesirable small –0,5 mm and large +3,0 mm fractions in the finished product decreased by 6,5% and 4,5%, respectively.

Keywords: agglomeration production, solid fuel, roller crushers, grooved rolls, inter-roll gap

Date of manuscript reception: 06.08.2025
Date of acceptance for publication: 08.09.2000
Date of publication: 25.09.2025

Author's information:

Dmitry A. Vlasenko – PhD (Eng), PhD candidate at Lipetsk State Technical University,
e-mail: vlsnkda@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-6829-061X.

1. Введение

В настоящее время проводятся многочисленные исследования в области совершенствования технологии агломерационного производства и модернизации оборудования, применяемого для его реализации. При производстве железорудного агломерата на эффективность самого аглопроцесса влияют такие факторы как: сортамент и характеристика используемых шихтовых материалов, компонентный и химический составы аглошихты, технологические режимы и параметры процесса спекания железорудного материала и т.д.

Подготовке отдельных компонентов агломерационной шихты уделяют отдельное внимание, так как от однородности гранулометрического и физико-химического состава в большой степени зависят качественные показатели готового агломерата и эффективность процесса агломерации.

Основные технико-экономические показатели и эффективность агломерационного процесса непосредственно зависят от гранулометрического состава измельченного твердого топлива, который оказывает существенное влияние на расход условного топлива в процессе спекания агломерационной шихты, удельную производительность агломерационных машин, качественные показатели готового агломерата, а также непосредственно влияет на вредные выбросы в атмосферу и т.д. [1–3].

В настоящее время для дробления и измельчения различных видов твердого топлива в агломерационном производстве наибольшее распространение получили четырехвалковые дробильные машины с нижними гладкими и верхними рифлеными валками [

4–9], в которых качество готового продукта зависит от множества факторов, одним из которых является обеспечение необходимого межвалкового зазора в процессе дробления материала, который непосредственно влияет на фракционный состав и грануло-

метрическое качество готового дробленого продукта.

Ранее в научных исследованиях [10–11] предложен математический метод расчета требуемого зазора между валками валковой дробилки в процессе дробления материала. Однако предложенная в данных работах зависимость применима для валковых дробильных машин, в которых применяются рабочие органы с гладкими бандажами, и не дает возможности рассчитать данный параметр для условий использования в дробильных машинах рифленых валков, так как в этом случае необходимо учитывать силы, возникающие при контактном взаимодействии дробимого материала с поверхностью рифлей сетки бандажа.

2. Актуальность исследования и постановка задачи

На основании вышесказанного следует, что обеспечение необходимого межвалкового зазора валковых дробильных машин с рифлеными рабочими органами за счет обоснования требуемого значения предварительной затяжки комплекта пружин их амортизационного устройства является весьма актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит повысить технико-экономическую эффективность валковых дробильно-измельчительных машин и повысить качество готового продукта при фракционной подготовке различных материалов.

3. Математическая модель валковой дробильной машины с рифлеными рабочими органами

Для определения предварительной затяжки (предварительного хода) комплекта пружин амортизационного устройства валковой дробилки с гладкими валками с целью обеспечения необходимого межвалкового зазора в работах [10, 11] предложена следующая зависимость:

$$X = \frac{2F_{\text{др}}(\cos \alpha_{\text{к.ср.}} + \sin \alpha_{\text{к.ср.}} \mu_{\text{с}}) - \delta k - 2\mu_{\text{м}} g m}{2k}, \quad (1)$$

где k – жесткость комплекта пружин амортизирующего устройства валковой дробилки, Н/м; $F_{\text{др}}$ – сила дробления материала для дробильных машин с гадкими рабочими органами [12–14], Н; $\alpha_{\text{к.ср.}}$ – угловое положение действующей силы дробления материала $F_{\text{др}}$ [12–14], рад; $\mu_{\text{м}}$ – коэффициент трения дробимого материала по материалу бандажа валка [15]; δ – требуемый верхний предел фракционного состава готового про-

дукта, м; m – масса валка валковой дробилки в сборе, кг.

С целью адаптации зависимости (1) для валковых дробильно-измельчительных машин с рифлеными валками в математической модели необходимо использовать вместо силы дробления $F_{\text{др}}$ сумму внешних сил ΣF_{x_i} , действующих на поверхность рабочего органа дробилки, в проекции на координатную ось x (рис. 1).

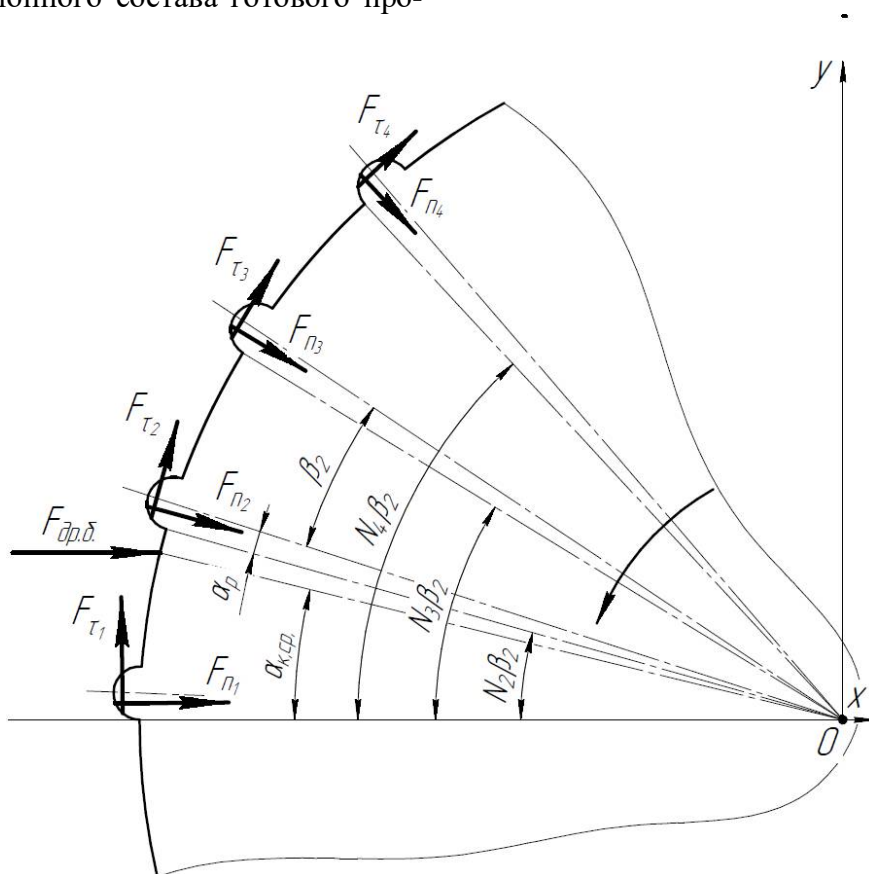


Рис. 1. Расчетная схема для определения суммы проекций сил ΣF_{x_i} , действующих на валок дробилки с рифленой поверхностью бандажей в процессе контактного взаимодействия с дробимым материалом

Сумма проекций на координатную ось x всех сил, действующих на рабочую поверхность валков в процессе дробления материала в валковой дробильно-измельчительной машине с рифлеными рабочими органами

определяется следующим аналитическим выражением:

$$\Sigma F_{x_i} = F_{\text{др.б.}} + \sum_1^N F_{x n_i} + \sum_1^N F_{x \tau_i}, \quad (2)$$

где $F_{др.б.}$ – сила дробления материала о рабочую поверхность бандажа (при условии исключения площади контактного взаимодействия дробимого материала с рабочей поверхностью рифлей сетки), Н; F_{xn_i} – проекция на координатную ось x нормальной силы дробления материала о рабочую поверхность i -й рифли сетки рифленого бандажа вала дробилки, Н; N – количество поперечных рифлей сетки бандажа, находящихся в угловом секторе дуги очага деформации материала, шт.; F_{xt_i} – проекция на координатную ось x тангенциальной силы дробления материала о рабочую поверхность i -й рифли сетки бандажа, Н.

Сила дробления материала о рабочую поверхность бандажа для рифленых валков валковой дробильной машины определяется с помощью зависимости, предложенной в исследованиях [9, 14].

Количество поперечных рифлей сетки рифленого вала в угловом секторе дуги очага деформации материала рабочими органами [9, 14]:

$$N = \frac{\alpha_{1.в}}{\beta_2}, \quad (3)$$

где $\alpha_{1.в}$ – угол сектора очага деформации для рифленых валков [9], рад; β_2 – угол между центрами окружностей соседних рифлей сетки, рад.

Угол сектора очага деформации дробимого материала для рифленых валков определяется с помощью следующей зависимости [9, 14]:

$$\alpha_{1.в} = \alpha_1 + \frac{\beta_2}{2}, \quad (4)$$

где α_1 – угол захвата куска дробимого материала для валковых дробилок с гладкими рабочими органами [4–9], рад.

Угол β_2 определяется из следующего выражения [9, 14]:

$$\beta_2 = 2 \arccos \left[\frac{R_6^2 - 0,5r_p^2 + r_k(R_6 - r_p)}{R_6(R_6 + r_k)} \right], \quad (5)$$

где R_6 – радиус рабочей поверхности бандажа рифленого вала, м; r_p – радиус рифли сетки бандажа, м; r_k – условный радиус куска дробимого материала, м.

В первом приближении в проекции на координатную ось x нормальная сила дробления материала о рабочую поверхность i -й рифли сетки бандажа вала определяется по следующей аналитической зависимости:

$$F_{xn_i} = F_{n_i} \cos((N_i - 1)\beta_2), \quad (6)$$

где F_{n_i} – нормальная составляющая силы дробления материала о рабочую поверхность i -й рифли сетки бандажа рифленого вала (определяется с помощью метода [9, 14]), Н; N_i – порядковый номер (относительно основания очага деформации дробимого материала) i -й рифли сетки бандажа вала рабочего органа.

Проекция на координатную ось x тангенциальной силы дробления при взаимодействии с рабочей поверхностью i -й рифли сетки бандажа определяется как:

$$F_{xt_i} = F_{t_i} \sin((N_i - 1)\beta_2), \quad (7)$$

где F_{t_i} – тангенциальная составляющая силы дробления материала о рабочую поверхность i -й рифли сетки бандажа рифленого вала (определяется с помощью метода [9, 14]), Н.

При расчетах использовались следующие конструктивно-технологические характеристики валковой дробильной машины и параметры условий процесса дробления: требуемый верхний предел фракции готового продукта $\delta = 3,0$ мм; жесткость комплекта пружин амортизирующего устройства рифленых валков $k = 5,2 \cdot 10^6$ Н/м [17]; масса одного вала в сборе $m = 4358$ кг; рабочая ширина бандажа вала $B_6 = 0,6$ м; радиус рабочей поверхности бандажа вала $R_6 = 0,45$ м; коэффициент трения скольжения материала корпусов подшипниковых опор рабочих органов по материалу направляющих станин $\mu_m = 0,12$.

При этом для аналитических расчетов использовались физико-механические характеристики твердого топлива, применяемого при фракционной подготовке шихтовых материалов на участке шихтоподготовки в агломерационном производстве в условиях Алчевского металлургического комбината ООО «ЮГМК»: для кокса доменного (фракция 20...80 мм, коэффициент трения скольжения по стали $\mu_m = 0,3$, предел прочности дробимого материала на одноосное сжатие $\sigma_m = 7,2$ МПа, эмпирический коэффициент, учитывающий степень анизотропии и характерную форму дробимого материала $k_\phi = 0,083$); для кокса сухого тушения (фракционный состав 100...200 мм, $\mu_m = 0,42$, $\sigma_m = 22,2$ МПа, $k_\phi = 0,186$) [12, 14].

Для наглядного представления результатов математического моделирования на рис. 2 и 3 представлено графическое отображение зависимостей необходимой предварительной затяжки комплекта пружин амортизационного устройства верхних валков дробилки ДЧГ 900×700 при фракционной подготовке кокса доменного и кокса сухого тушения.



Рис. 2. Зависимость предварительной затяжки комплекта пружин амортизационного устройства верхних валков дробилки ДЧГ 900×700 при дроблении кокса доменного

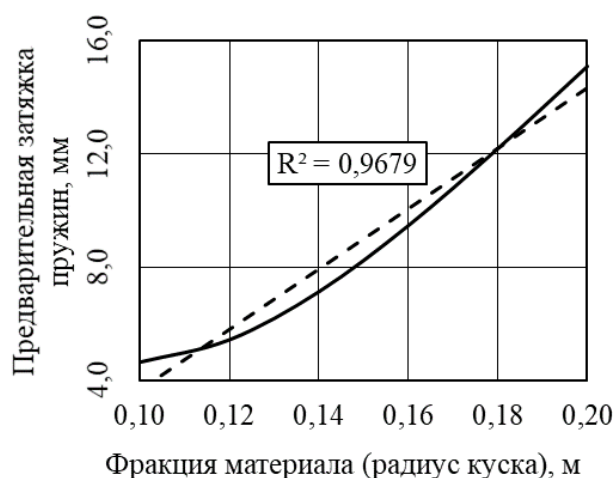


Рис. 3. Зависимость предварительной затяжки комплекта пружин амортизационного устройства верхних валков дробилки ДЧГ 900×700 при дроблении кокса сухого тушения

На основании анализа графических зависимостей, представленных на рис. 2 и 3, установлено, что зависимости предварительной затяжки комплекта пружин амортизационного устройства верхних рабочих органов дробилки ДЧГ 900×700 при дроблении различных видов твердого топлива имеют характер достаточно близкий к линейному, что позволяет для упрощения расчетов в производственных условиях использовать функцию вида

$$X_3 = k_3 D_{н.м.},$$

где k_3 – эмпирический коэффициент, учитывающий физико-механические свойства дробимого материала; $D_{н.м.}$ – верхний предел фракционного состава исходного сырья, м.

При этом коэффициенты детерминации аппроксимирующих моделей составили $R^2=0,978$ и $R^2=0,997$, что с высокой степенью соответствуют аналитической модели.

4. Практическое применение и испытание в производственных условиях

Практическое применение и промышленное освоение разработанного способа определения и регулирования межвалкового зазора

валковых дробильных машин с рифлеными рабочими органами заключается в возможности обеспечения предварительной затяжки комплекта пружин амортизационного устройства для обеспечения необходимого фракционного состава дробленого продукта при дроблении и измельчении различных каменно-рудных материалов с заведомо известными физико-механическими свойствами.

В таблице представлены отдельные физико-механические параметры дробимых ма-

териалов (твердого топлива) и практические рекомендации по предварительной регулировке комплекта пружин амортизационного устройства четырехвалковой дробилки ДЧГ 900×700, применяемой на участке подготовки шихтовых компонентов в агломерационном цехе «АМК» ООО «ЮГМК», для обеспечения технологических требований агломерационного процесса в отношении содержания отдельных фракций в дробленном твердом топливе.

Таблица

Рекомендации по предварительной затяжке комплекта пружин амортизационного устройства дробилки ДЧГ 900×700 при дроблении кокса доменного и кокса сухого тушения

Показатель	Значение	
	Кокс доменный	Кокс сухого тушения
Вид дробимого материала		
Фракция, мм	–25,0	–140,0
Предел прочности дробимого материала на сжатие, МПа	7,2	22,2
Коэффициента трения дробимого материала по стали	0,3	0,42
Верхний предел фракции дробленого материала, мм	–3,0	–3,0
Рекомендуемая затяжка пружин амортизационного устройства верхних рифленых валков, мм	1,1	6,8

Предварительные испытания в производственных условиях способа регулировки межвалкового зазора валковых дробильных машин с рифлеными рабочими органами осуществлялось на участке шихтоподготовки агломерационного цеха «АМК» ООО «ЮГМК».

В качестве объекта экспериментальных исследований выступала дробилка ДЧГ 900×700 с рифлеными верхними валками (рис. 4). В процессе экспериментальных исследований осуществлялось измельчение двух видов твердого топлива, используемых в условиях агломерационного производства: кокса доменного размерами 0...25,0 мм и кокса сухого тушения фракцией –140 мм. Регулирование амортизационного устройства нижних валков производилось с помощью метода [10, 14], а предварительная затяжка комплекта пружин амортизационного устройства верхних валков – согласно рекомендациям, представленным в таблице.



Рис. 4. Четырехвалковая дробилка ДЧГ 900×700 в условиях проведения испытаний способа регулирования затяжки комплекта пружин амортизационного устройства

При определении гранулометрического состава различных видов дробленого твердого топлива согласно общепринятой методике

[18] использовались сита с размерами отверстий 0,5 и 3,0 мм. Измельченный материал отбирался с участков транспортной ленты на ленточном конвейере подачи твердого топлива в отделение дозирования шихтовых материалов, а затем разделялся на отдельные фракционные составляющие с дальнейшим их провешиванием на тарированных лабораторных весах.

На основании предварительных испытаний в производственных условиях участка подготовки шихты агломерационного цеха «АМК» ООО «ЮГМК» установлено, что при фракционной подготовке различных видов твердого топлива в дробилке ДЧГ 900×700 с использованием рекомендованных режимных параметров по регулированию зазора между верхними рифлеными валками улучшаются качественные показатели дробленого продукта по фракционному составу (для технологических условий агломерационного процесса): содержание в готовом продукте нежелательных мелких фракций –0,5 мм снизилось на 6,5%, а крупных +3,0 мм уменьшилось на 4,5%, что оказывает положительное влияние на процесс спекания агломерата.

При этом на основании результатов производственных испытаний, подтверждающих адекватность теоретических предположений, рекомендовано в производственных условиях для расчета предварительной затяжки комплекта пружин амортизационного устройства верхних рифленых рабочих органов дробилки ДЧГ 900×700 использовать аппроксимированные функции:

- при фракционной подготовке кокса доменного – $X_3 = 0,36 D_{\text{и.м.}} + 0,72$;

- при фракционной подготовке кокса сухого тушения – $X_3 = 2,14 D_{\text{и.м.}} + 1,51$.

5. Заключение

1. Разработан математический аппарат аналитического определения межвалкового зазора валковых дробильных машин с риф-

леными рабочими органами. Предложены аналитические зависимости для определения сил, действующих на валок в плоскости их перемещения в процессе дробления материала и предварительной затяжки комплекта пружин амортизационного устройства валковой дробилки для обеспечения требуемого межвалкового зазора в процессе дробления материала.

2. Предложены рекомендации по регулированию амортизационного устройства верхних рифленых валков дробилки ДЧГ 900×700, применяемой в агломерационном цехе «АМК» ООО «ЮГМК» для фракционной подготовки кокса доменного и кокса сухого тушения, используемых в технологическом процессе аглодоменного производства. Предварительные производственные испытания предложенного метода показали, что при фракционной подготовке твердого топлива в дробилке ДЧГ 900×700 с использованием рекомендованных режимных параметров по регулированию межвалкового зазора положительно сказывается на качестве дробленого продукта по фракционному составу согласно технологическим требованиям агломерационного процесса (содержание в готовом продукте нежелательных мелких фракций –0,5 мм снизилось на 6,5%, а крупных +3,0 мм уменьшилось на 4,5%).

3. Перспективным направлением дальнейшего развития исследований в данном направлении является проверка адекватности разработанного метода обоснования предварительной регулировки амортизационного устройства валковой дробилки с рифленой поверхностью бандажей с дальнейшим испытанием его в промышленных условиях, а также адаптация разработанной математической модели для условий дробления различных каменно-рудных материалов в валковых дробильных машинах, в которых используются рабочие органы с рифленой рабочей поверхностью.

Список литературы

1. Коротич В.И., Фролов Ю.А., Бездежский Т.Н. Агломерация рудных материалов. Научное издание. Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2003. 400 с.
2. Мищенко И.М. Совершенствование технологии и оборудования агломерационного производства // *Металлургические процессы и оборудование*. 2011. № 3 (25). С. 35–44.
3. Вегман Е.Ф., Жеребин Б.П., Похвиснев А.Н., Юсфин Ю.С., Курунов И.Ф. Пареньков А.Е., Черноусов П.И. *Металлургия чугуна*. М.: Академкнига, 2004. 774 с.
4. Перов В.А., Андреев С.Е., Биленко Л.Ф. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра, 1990. 301 с.
5. Клушанцев Б.В., Косарев А.И., Муйземнек Ю.А. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации. М.: Машиностроение, 1990. 320 с.
6. Subba Rao D.V. *Minerals and Coal Process Calculations*. London: Taylor & Francis Group, 2016. 354 p. DOI: 10.1201/9781315225524.
7. Mikulionok I.O. Classification of Roll Grinders for Lumpy and Bulk Materials (Survey of Patents) // *Chem Petrol Eng*. 2021. № 56. Pp. 951–957. DOI: 10.1007/s10556-021-00867-3.
8. Egbe E.A.P., Olugboji O.A. Design, Fabrication and Testing of a Double Roll Crusher // *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2016. Vol. 35 (11). Pp. 511–515. DOI: 10.14445/22315381/IJETT-V35P303.
9. Власенко Д.А., Левченко Э.П., Жильцов А.П., Харитоненко А.А. Дробильное оборудование предприятий черной металлургии. Конструкция и расчет. Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2023. 140 с.
10. Мележик Р.С., Власенко Д.А. Исследование динамики валковой дробилки в процессе дробления материала // *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического института*. 2020. № 21 (64). С. 94–100.
11. Мележик Р.С., Власенко Д.А. Иссле-

References

1. Korotich V.I., Frolov Yu.A., Bezdezhskiy T.N. *Agglomeratsiia rudnykh materialov. Nauchnoe izdanie* [Agglomeration of ore materials. Scientific publication]. Ekaterinburg, GOU VPO «UGTU UPI», 2003. 400 p. (In Russian)
2. Mishchenko I.M. Sovershenstvovanie tekhnologii i oborudovaniia aglomeratsionnogo proizvodstva [Improvement of technology and equipment for agglomeration production]. *Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie*, 2011, № 3 (25). Pp. 35–44. (In Russian)
3. Vegman E.F., Zherebin B.P., Pokhvisnev A.N., Yusfin Yu.S., Kurunov I.F., Paren'kov A.E., Chernousov P.I. *Metallurgiiia chuguna* [Metallurgy of cast iron]. Moscow, Akademkniga, 2004. 774 p. (In Russian)
4. Perov V.A., Andreev S.E., Bilenko L.F. *Droblenie, izmelchenie i grokhochenie poleznykh iskopaemykh* [Crushing, grinding and screening of minerals]. Moscow, Nedra, 1990. 301 p. (In Russian)
5. Klushantsev B.V., Kosarev A.I., Muizemnek Yu.A. Drobilki. Konstruktsiia, raschet, osobennosti ekspluatatsii [Crushers. Design, calculation, operating features.]. Moscow, Mashinostroenie, 1990. 320 p. (In Russian)
6. Subba Rao D.V. *Minerals and Coal Process Calculations*. London, Taylor & Francis Group, 2016. 354 p. DOI: 10.1201/9781315225524.
7. Mikulionok I.O. Classification of Roll Grinders for Lumpy and Bulk Materials (Survey of Patents). *Chem Petrol Eng*, 2021, № 56. Pp. 951–957. DOI: 10.1007/s10556-021-00867-3.
8. Egbe E.A.P., Olugboji O.A. Design, Fabrication and Testing of a Double Roll Crusher. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 2016, Vol. 35 (11). Pp. 511–515. DOI: 10.14445/22315381/IJETT-V35P303.
9. Vlasenko D.A., Levchenko E.P., Zhilytsov A.P. Kharitonenko A.A. *Drobnilnoe oborudovanie predpriiatiy chernoy metallurgii. Konstruktsiia i raschet* [Crushing equipment for ferrous metallurgy enterprises. Design and calculation]. Lipetsk, Lipetskiy go-

дование надежности и анализ повышения эффективности дробилки ДЧГ 900×700 с усовершенствованным приводом в условиях агломерационного цеха АМК ООО «ЮГМК» // Черные металлы. 2025. № 4. С. 4–10.

12. Vlasenko D.A. Justification of rational energy-power parameters of the drive of roll crushers // *Steel in Translation*, 2023. Vol. 53. No. 7. Pp. 640–647. DOI: 10.3103/S0967091223070124

13. Vlasenko D.A. Modeling and Industrial Development of Grinding Processes in Roller Mills with Corrugated Rolls. *Steel in Translation*. 2022. Vol. 52. No. 4. Pp. 445–450, DOI: 10.3103/s0967091222040179

14. Власенко Д.А. Развитие теории процессов дробления и практика совершенствования валковых дробилок с гладкими и рифлеными валками. Алчевск: ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2025. 172 с.

15. Никеров В.А. Физика для вузов. Механика и молекулярная физика. М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и Ко», 2012. 136 с.

16. Тер-Криков А.М., Шабунин М.И. Курс математического анализа. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2015. 672 с.

17. Фещенко В.Н. Справочник конструктора. Книга 1. Машины и механизмы. М.: Инфра-Инженерия, 2016. 400 с.

18. ГОСТ 2093-82 Топливо твердое. Ситовый метод определения гранулометрического состава. Введ. 1983-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1983. 20 с.

sudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet, 2023. 140 p. (In Russian)

10. Melezhik R.S., Vlasenko D.A. Issledovanie dinamiki valkovoy drobilki v protsesse drobleniia materiala [Study of the dynamics of a roller crusher in the process of crushing material]. *Sbornik nauchnykh trudov Donbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo institute*, 2020, № 21 (64). Pp. 94–100. (In Russian)

11. Melezhik R.S., Vlasenko D.A. Issledovanie nadezhnosti i analiz povysheniia effektivnosti drobilki DChG 900×700 s usovershenstvovannym privodom v usloviakh aglomeratsionnogo tsekha АМК ООО «YuGMK» [Research of reliability and analysis of increasing the efficiency of the crusher DChG 900×700 with an improved drive in the conditions of the sintering shop of AMP of LLC «SMMC»]. *Chernye metally*, 2025, № 4. Pp. 4–10. (In Russian)

12. Vlasenko D.A. Justification of rational energy-power parameters of the drive of roll crushers. *Steel in Translation*, 2023, Vol. 53. No. 7. Pp. 640–647. DOI: 10.3103/S0967091223070124

13. Vlasenko D.A. Modeling and Industrial Development of Grinding Processes in Roller Mills with Corrugated Rolls. *Steel in Translation*, 2022, Vol. 52. No. 4. Pp. 445–450. DOI: 10.3103/s0967091222040179

14. Vlasenko D.A. *Razvitie teorii protsessov drobleniia i praktika sovershenstvovaniia valkovykh drobilok s gladkimi i riflenymi valkami* [Development of the theory of crushing processes and the practice of improving roller crushers with smooth and corrugated rolls]. Alchevsk, GOU VO LNR «DonGTI», 2025. 172 p. (In Russian)

15. Nikerov V.A. *Fizika dlia vuzov. Mekhanika i molekuliarnaia fizika* [Physics for Universities. Mechanics and Molecular Physics]. Moscow, Izdatelsko-torgovaia korporatsiya «Dashkov i Ko», 2012. 136 p. (In Russian)

16. Ter-Krikorov A.M., Shabunin M.I. *Kurs matematicheskogo analiza* [Course of Mathematical Analysis]. Moscow, Binom. Laboratoriia znaniy, 2015. 672 p. (In Russian)

17. Feshchenko V.N. *Spravochnik kon-*

+ *struktora. Kniga 1. Mashiny i mekhanizmy*
 + [Designer's Handbook. Book 1. Machines and
 + Mechanisms]. Moscow, Infra-Inzheneriia,
 + 2016. 400 p. (In Russian)
 +
 + 18. GOST 2093-82. *Solid fuel. Sieve*
 + *method for determining granulometric compo-*
 + *sition. Introduced.* Moscow, Publishing house
 + of standards, 1983. 20 p. (In Russian)

УДК (UDC) 621.86

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИЗАЦИИ
ОБРАБОТКИ И АНАЛИТИКИ ДАННЫХ ПРИ ТЯГОВОМ РАСЧЕТЕ
МНОГОПРИВОДНЫХ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВFEATURES OF APPLICATION OF AUTOMATION ELEMENTS
PROCESSING AND ANALYTICS OF DATA IN TRACTION CALCULATION
MULTI-DRIVE BELT CONVEYORSГончаров К.А.
Goncharov K.A.Российский университет транспорта (Москва, Россия)
Russian University of Transport (Moscow, Russian Federation)

Аннотация. Проектирование многоприводных ленточных конвейеров является достаточно трудоемким процессом при условии, что даже этот процесс реализуется на основе значительного числа принятых ограничений и упрощений. В настоящей статье предложена концепция мобильной проектной среды – универсального программного решения на основе технологий баз данных для проектирования и расчета различных объектов машиностроения, способного быстро разворачиваться в различных условиях и адаптироваться под новые объекты проектирования. На примере процедуры тягового расчета многоприводного ленточного конвейера показаны особенности построения концептуальных схем мобильных проектных сред, определены обобщенные элементы, характерные для других объектов машиностроения. Применение мобильных проектных сред и их дальнейшее развитие позволяет реализовывать масштабные цифровые эксперименты над различными объектами проектирования на основе накопления и анализа больших массивов параметров синтезируемых возможных проектных решений с дальнейшей реализацией выбора итогового рационального варианта.

Ключевые слова: мобильная проектная среда, базы данных, ленточный конвейер, тяговый расчет.

Дата получения статьи: 03.07.2025
Дата принятия к публикации: 01.09.2025
Дата публикации: 25.09.2025

Сведения об авторе:

Гончаров Кирилл Александрович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические средства», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта»,
e-mail: goncharov_bgu@mail.ru.

ORCID: 0000-0002-5895-1162

Abstract. Designing multi-drive belt conveyors is a rather labor-intensive process, provided that even this process is implemented based on a significant number of accepted restrictions and simplifications. This article proposes a concept of a mobile design environment - a universal software solution based on database technologies for designing and calculating various mechanical engineering objects, capable of quickly deploying in various conditions and adapting to new design objects. Using the example of the procedure for traction calculation of a multi-drive belt conveyor, the features of constructing conceptual diagrams of mobile design environments are shown, generalized elements characteristic of other mechanical engineering objects are defined. The use of mobile design environments and their further development allows for the implementation of large-scale digital experiments on various design objects based on the accumulation and analysis of large arrays of parameters of synthesized possible design solutions with subsequent implementation of the choice of the final rational option.

Keywords: mobile project environment, databases, belt conveyor, traction calculation.

Date of manuscript reception: 03.07.2025
Date of acceptance for publication: 01.09.2025
Date of publication: 25.09.2025

Author's information:

Kirill A. Goncharov – Doctor of Technical Sciences, associate Professor, Professor of the Department of Land Transport and Technological Means, Russian University of Transport,
e-mail: goncharov_bgu@mail.ru.

ORCID: 0000-0002-5895-1162

1. Введение

Тяговый расчет многоприводных ленточных конвейеров является трудоемкой процедурой, охватывающей множество различных сопутствующих аспектов, учитывающих как удлинение лент (тяговых и грузонесущей), так и отклонения механических характеристик приводов [1].

В зависимости от установленной степени точности решения задач проектирования концептуально наиболее сложным с позиции обрабатываемого объема данных при проведении тягового расчета многоприводных ленточных конвейеров являются сочетания, включающие в себя признаки m1.6 и m3.3 [1; 2], а именно:

признак – m1.6 – тяговые усилия распределяются с учетом механических характеристик приводов, их возможных отклонений и продольного растяжения ленты;

признак – m3.3 – сопротивления движению ленты конвейера определяются подробным тяговым расчетом с обходом трассы конвейера с дифференцированным подходом к определению коэффициента сопротивления движению на каждом участке трассы конвейера.

В описании указанных признаков отдельно стоит остановиться на возможных сочетаниях отклонений механических характеристик приводов.

В работе [3] приведены способы оценки трудоемкости тягового расчета многоприводных ленточных конвейеров в виде определения количества сочетаний отклонений механических характеристик приводов. На примере системы приводов ленточного конвейера, состоящей из трех последовательно расположенных барабанных приводов, в каждом из которых барабан приводится двумя электродвигателями, показано, что общее количество расчетных сочетаний отклонений механических характеристик приводов составит $N = 2187$ при учете для каждого электродвигателя всего трех характерных параметров: отклонения скольжения электродвигателя в сторону увеличения жесткости механической характеристики – α , отклонения в сторону смягчения механической характеристики – β ,

номинального значения скольжения – $S_{ном}$. Таким образом, в интервале отклонений скольжения $\alpha... \beta$ помимо граничных значений учитывается только одно промежуточное – медианное значение $S_{ном}$. В случае если в данном интервале, к примеру, совокупно учесть десять значений (два граничных и восемь промежуточных), то количество анализируемых сочетаний отклонений скольжения для описанной системы приводов составит $N = 3000000$. Для обработки и анализа подобного массива данных целесообразно применять особые алгоритмы и программные решения.

Стоит отметить, что указанное количество сочетаний соответствует только одной конфигурации системы приводов конвейера. Для принятия взвешенного решения с учетом множества анализируемых конфигураций систем приводов [4, 5] в обобщенной проектной ситуации количество расчетных сочетаний отклонений скольжения может значительно увеличиваться. К примеру, в работах [4, 5] рассматривается 18 конфигураций систем приводов. В случае применения подхода к определению количества сочетаний, описанного выше, общее количество расчетных сочетаний отклонений механических характеристик составит $N = 806130910$.

Необходимость обрабатывать указанный объем данных единым массивом, как таковая, отсутствует. В данном случае целесообразно формировать проектные вертикали: «конфигурация системы приводов» → «массив данных». Таким образом, в процесс проектирования вводится элемент структурирования данных второй очереди (по принадлежности к какому-либо подтипу данных), что позволит внутри подтипа применить алгоритмы статистической обработки результатов моделирования (определить наилучшее и наихудшее сочетание с позиции разброса тяговых усилий или величин максимального натяжения лент, определить и ранжировать вероятности фактической реализации диапазонов возможных значений натяжений лент, прогнозировать с учетом принятых допущений теоретический ресурс работы двигателей приводов, а также грузонесущей и тяговых лент).

2. Цель исследования

Целью настоящего исследования является определение обобщенной конфигурации мобильной проектной среды на основе технологий баз данных при проектировании многоприводных ленточных конвейеров, а также синтез обобщенных алгоритмов работы с массивами больших данных, формирующимися в процессе проектирования указанного технического объекта.

3. Особенности проведения исследования

Введем понятие мобильной проектной (расчетной) среды – специализированного программного обеспечения, не имеющего направленности на конкретный объект проектирования, служащего для сравнительно быстрого развертывания программно реализованных алгоритмов проектирования технических объектов, в том числе на основе обработки больших массивов данных.

Одним из рациональных решений для реализации мобильных проектных сред являются технологии реляционных баз данных. С одной стороны правильно организованная база данных позволяет грамотно структурировать проектные данные, а с другой – син-

тезировать новые посредством исполнения программных скриптов SQL, в которые закладываются проектные алгоритмы.

В связи с этим все программные скрипты для конкретной базы данных, представляющей собой мобильную проектную среду, можно условно разделить на три вида:

1) организационно-служебные скрипты – формируют необходимый базовый набор таблиц для размещения данных;

2) проектно-расчетные скрипты – реализуют какие-либо проектные или расчетные алгоритмы, в результате исполнения которых синтезируются и размещаются в таблицах новые данные;

3) аналитические скрипты – не создают новые данные, служат для систематизации уже существующих (в том числе синтезированных) данных и получения различных результатов статистической обработки.

Поскольку проектирование любого технического объекта сопровождается наличием нормативных ограничений, то в данном случае актуально применение концепции двухполюсных баз данных [6]. Уровень применения данной концепции – проектно-расчетные скрипты. Обобщенная концептуальная схема мобильной проектной среды представлена на рис. 1.



Рис. 1. Обобщенная концептуальная схема мобильной проектной среды

Предложенная схема фактически является универсальной архитектурой любой мобильной проектной среды.

В качестве примера рассмотрим особенности построения мобильной проектной среды реализации процедуры тягового расчета многоприводного ленточного конвейера (рис. 2).

Организационные скрипты в данном случае будут содержать:

1. Скрипт создания таблицы для последующего внесения исходных данных (к данной таблице расчетные скрипты будут регулярно обращаться при определении сопротивлений движению конвейерной ленте на различных участках).

2. Скрипт создания таблицы с массивом сочетаний отклонений скольжения электродвигателей приводов. Фактически является одной из частей фиксированного набора скриптов, учитывающих возможность установки одного, двух и четырех двигателей в структуре привода для конвейеров, оснащенных от одного до десяти приводами в целом. Скрипты, подлежащие развертыванию в конкретной проектной ситуации, определяются в соответствии с методикой формирования схем систем приводов [7]. Данная таблица также итерационно заполняется проектно-расчетными скриптами при синтезе новых данных.

3. Скрипт создания таблицы с параметрами характерных точек трассы конвейера. Структура представления данных в настоящей таблице аналогична представлению, заложенному в пользовательский интерфейс программы [8]. Данная таблица, аналогично предыдущей, заполняется проектно-расчетными скриптами при синтезе новых данных.

4. Скрипты создания таблиц для внесения нормативных ограничений. Данная таблица заполняется для формирования комплекса проектно-расчетных ограничений, через которые далее проектно-расчетные скрипты будут, как через фильтр, пропускать все результаты расчета до заполнения соответствующих таблиц.

Проектно-расчетные скрипты в рассматриваемом примере будут содержать:

1. Скрипт для формирования уравнения обхода по контуру трассы конвейера при тяговом расчете. Данный скрипт принимает данные из таблицы с параметрами характерных точек и таблицы с массивом сочетаний отклонений скольжения, формирует уравнение обхода трассы и записывает его коэффициенты в таблицу массивов сочетаний отклонений скольжения (итоговое уравнение имеет линейный вид).

2. Скрипт определения тяговых усилий. Решает систему уравнений для соответствующего сочетания отклонений скольжения электродвигателей системы приводов. Принимает данные из таблицы исходных данных и таблицы с массивом сочетаний отклонений скольжения. После проведения расчета возвращает данные в таблицу массивов сочетаний отклонений скольжения.

3. Скрипт определения натяжений в характерных точках трассы конвейера. Принимает данные из таблицы с массивом сочетаний отклонений скольжения и таблицы с параметрами характерных точек. После выполнения расчета возвращает данные в таблицу с параметрами характерных точек трассы конвейера.

Все указанные проектно-расчетные скрипты перед проведением расчетных процедур принимают также данные из таблицы для внесения нормативных ограничений. После проведения расчета каждый из скриптов перед возвращением данных в соответствующие таблицы верифицирует их с учетом нормативных ограничений.

Аналитические скрипты в описываемом примере могут содержать следующие решения:

1. Скрипты, определяющие наилучшие сочетания отклонений скольжения в результате проведенных расчетов по значению какого-либо одного параметра (простейшие скрипты запросов типа SELECT с применением агрегатных функций).

2. Скрипты, определяющие наилучшие сочетания результатов расчета по значению нескольких параметров (реализуют алгоритмы различных применимых в конкретной ситуации методов принятия решений).

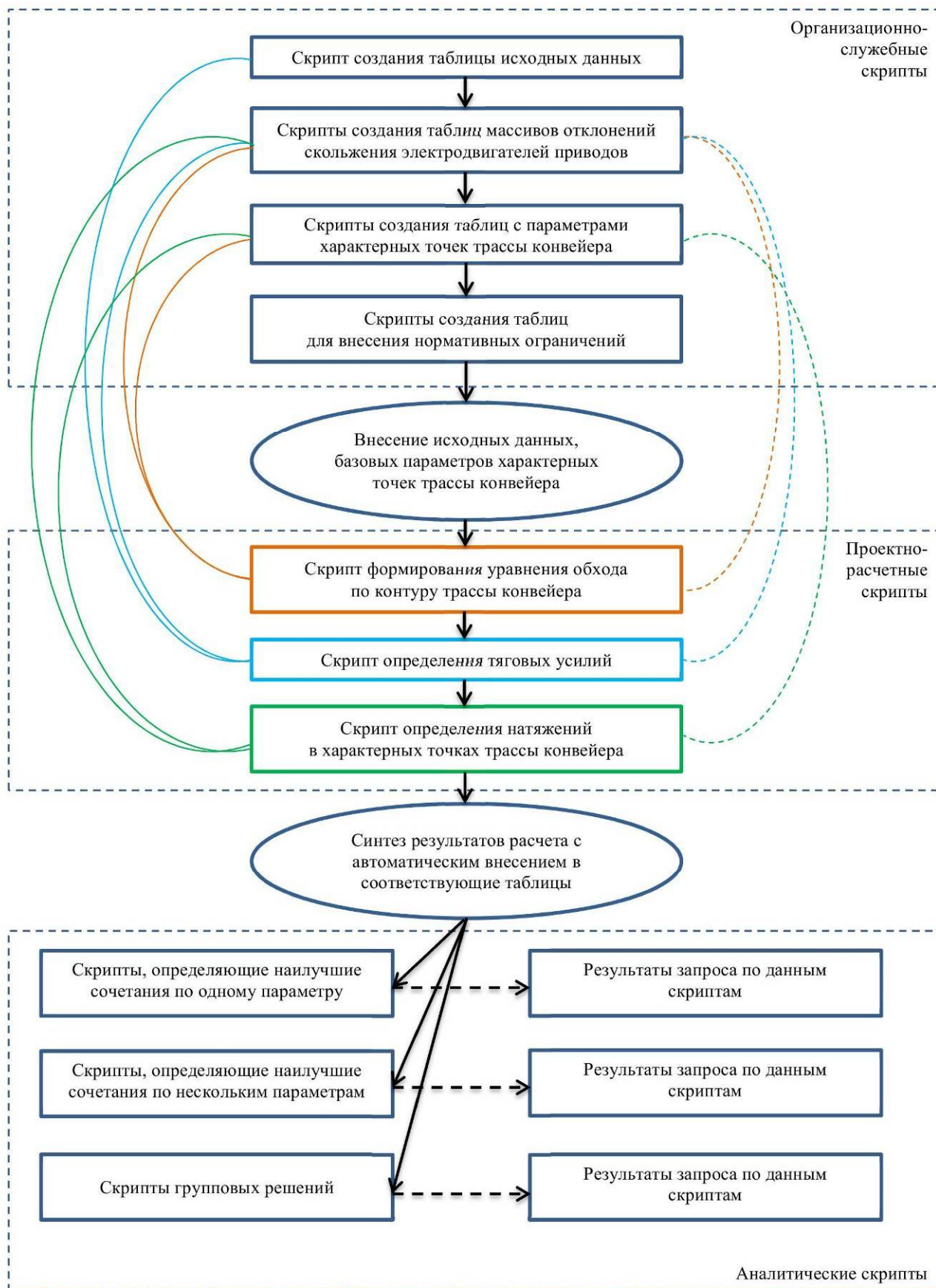


Рис. 2. Концептуальная схема мобильной проектной среды реализации процедуры тягового расчета многоприводного ленточного конвейера

3. Скрипты, описывающие групповые решения (определение массивов усредненных результатов, вероятности реализации тех или иных сочетаний отклонений скольжения (групп сочетаний) по отношению ко всему потоку данных и т.п.).

Стоит отметить, что мобильная проектная среда по функциональному назначению принципиально отличается от базы данных наличием блока алгоритмов, непосредственно синтезирующих новые данные с их автоматическим вводом. В связи с этим представление концептуальной схемы мобильной проектной среды целесообразно производить не в виде комплекса взаимосвязанных таблиц, как принято для баз данных и показано в работе [7], а в виде комплекса взаимосвязанных скриптов, как показано на рис. 2, что позволяет отслеживать, в том числе, корректность применения проектных и расчетных алгоритмов.

В предложенной на рис. 2 схеме аналитические скрипты объединены в группы по возможным зонам поиска данных, так как в обобщенном случае специалисту для достижения промежуточных узких проектных целей может потребоваться анализ по любому случайному параметру из всего массива параметров решения.

Предложенная концептуальная схема мобильной проектной среды для тягового расчета многоприводных ленточных конвейеров позволяет перейти от предварительного вы-

явления возможных опасных сочетаний отклонений скольжения электродвигателей приводов к анализу всего массива сочетаний возможных подобных отклонений, исчисляемых миллионами комбинаций, как было показано выше. Данное обстоятельство, в свою очередь, может привести к значительным прорывам в уточнении закономерностей поведения систем приводов ленточных конвейеров, представленных в [1].

5. Заключение

Программная реализация описанного в настоящей статье многокомпонентного решения в виде мобильной проектной среды позволит перейти к накоплению данных по реализации различных схем систем приводов и их системной обработке методами больших данных, что фактически является масштабным цифровым экспериментом в рамках исследований многоприводных ленточных конвейеров.

Стоит отметить, что структура мобильной проектной среды, описанная в настоящей статье, может быть значительно расширена, начиная от реализации алгоритмов формирования схем систем приводов [7] и заканчивая реализацией алгоритмов принятия рациональных проектных решений при поиске итогового варианта системы приводов с учетом комплекса различных критериев эффективности [5].

Список литературы

1 Гончаров К. А. Тяговый расчет многоприводных ленточных конвейеров. Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2021. 271 с.

2 Гончаров К.А., Дунаев В.П. Комплексный подход к тяговому расчету ленточных конвейеров // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2018. №2. С. 144–151. DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-02-144-151.

3 Гончаров К.А. Система сочетаний отклонений скольжения электродвигателей при вероятностном моделировании распределения тяговых усилий в многодвигатель-

References

1. Goncharov K.A. *Tyagovyy raschet mnogoprivodnykh lentochnykh konveyerov* [Traction calculation of multi-drive belt conveyor]. Kursk, ZAO Universitetskaya kniga, 2021. 271 p. (In Russian)

2. Goncharov K.A., Dunaev V.P. The integrated approach to traction calculation of belt conveyors. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, No.2, pp. 144-151. DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-02-144-151 (In Russian)

3. Goncharov K.A. Combination system of slide variations of electric motors when using a probabilistic modeling approach of tractive ef-

ных приводах ленточных конвейеров // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №3. С. 288–295. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-03-288-295.

4 Гончаров К.А. Определение рационального варианта системы приводов ленточного конвейера ЛСТ-1600 // Вестник Брянского государственного технического университета. 2011. №4(32). С. 33–38.

5 Гончаров К.А. Модификация метода анализа иерархий на основе устранения субъективности экспертных оценок на примере выбора рационального варианта системы приводов ленточного конвейера // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2024. №3. С. 170–178. DOI: 10.22281/2413-9920-2024-10-03-170-178.

6 Гончаров К. А. Концепция двухполусных баз данных при строгом нормативном контроле объектов создаваемых информационных систем // Цифровые, компьютерные и информационные технологии в науке и образовании: Сб. статей Межрегион. научно-практич. конф. с международным участием, Брянск, 01–02 ноября 2023 года. Брянск: Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского, 2023. С. 31-35.

7 Гончаров К.А. Обоснование выбора систем приводов протяженных ленточных конвейеров со сложной трассой: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04. Брянский государственный технический университет. Брянск, 2011. 149 с.

8 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023687226 Российская Федерация. Тяговый расчет мобильной транспортно-технологической системы с гибким тяговым органом: № 2023685977: заявл. 28.11.2023; опубл. 13.12.2023 / К. А. Гончаров; заявитель ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г.Петровского».

fort distribution in multimotor drives of multidrive belt conveyors. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.3, pp. 288-295. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-03-288-295 (In Russian)

4. Goncharov K.A. Opredeleniye racionalnogo varianta sistemy privodov lentochnogo konveyera LST-1600. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, No.4(32), pp. 33–38. (In Russian)

5. Goncharov K.A. Modification of the method of hierarchy analysis based on the elimination of the subjectivity of expert assessments using the example of choosing a rational option for a belt conveyor drive system. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2024, No.3, pp. 170-178. DOI: 10.22281/2413-9920-2024-10-03-170-178 (In Russian)

6. Goncharov K. A. The concept of bipolar databases under strict regulatory control of objects of created information systems. In: Digital, computer and information technologies in science and education: Collection of articles of the Interregional scientific and practical conference with international participation, Bryansk, November 1–2, 2023. Bryansk, Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky, 2023, pp. 31–35. (In Russian)

7. Goncharov K.A. Justification of the choice of drive systems long belt conveyors with complex route: Diss. Cand. Sci. (Engineering). Bryansk. 2011. (In Russian)

8. Certificate of state registration of computer program No. 2023687226 Russian Federation. Traction calculation of a mobile transport and technological system with a flexible traction unit: No. 2023685977: declared. 28.11.2023; published. 13.12.2023. K.A. Goncharov; applicant Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky (In Russian)

УДК (UDC) 86-868

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
И АНАЛИЗ РЕЖИМОВ УПРАВЛЕНИЯ В РОТОРНОМ ВИБРОПРИВОДЕ
С КИНЕМАТИЧЕСКИ НЕУРАВНОВЕШЕННОЙ МАССОЙ****MODELING OF DYNAMIC CHARACTERISTICS AND ANALYSIS OF CONTROL
MODES, IN ROTARY VIBRODRIVE WITH A KINEMATICALLY UNBALANCED MASS**Закиров Р.Г.
Zakirov R.G.Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)
(Челябинск, Россия)
South Ural State University (Scientific Research University) (Chelyabinsk, Russian Federation)

Аннотация. В статье рассматривается проблема создания управляемых параметров вибрационных полей, необходимых для учета физико-механических и реологических свойств обрабатываемых материалов и достижения максимальной эффективности вибрационной техники. Показаны перспективы использования в вибрационных машинах роторного вибропривода с кинематически неуравновешенной массой, имеющего широкие возможности управления параметрами генерируемых колебаний. Проведено моделирование процесса работы роторного вибропривода, получены аналитические и графические зависимости параметров колебаний от параметров настройки, определены наиболее эффективные и удобные в использовании параметры управления. Проведен анализ возможных режимов настройки вибропривода, реализуемых в процессе его эксплуатации. Установлено, что, изменяя частоту вращения ротора, можно получать как низкочастотные колебания центра масс ротора во всем возможном диапазоне амплитуды, так и высокочастотные колебания. Кроме того, при различных значениях диаметра диска ротора, в виброприводе можно регулировать амплитуду колебаний при постоянной частоте. Вынуждающая сила, создаваемая в роторном виброприводе, при одной и той же частоте вращения, равных габаритах и массах ротора и булав будет существенно больше по сравнению с центробежными вибровозбудителями. Реализованная в виброприводе регулировка направленной формы траектории центра масс ротора достигается без использования дополнительных масс и упругих элементов. Вибрационная машина с предлагаемым роторным виброприводом существенно расширит возможности создания оптимальных параметров вибрационных полей в технологических процессах.

Ключевые слова: вибровозбудитель, вибропривод, вибрационная машина, параметры колебаний, форма колебаний.

Abstract. The article considers the problem of creating controlled parameters of vibration fields necessary to take into account the physical, mechanical and rheological properties of the processed materials and to achieve maximum efficiency of vibration techniks. The prospects of using a rotary vibration drive with a kinematically unbalanced mass in vibration machines, which has wide possibilities for controlling the parameters of the generated oscillations, are shown. The modeling of the process operation of rotary vibration-drive was carried out, analytical and graphical dependences of the oscillation parameters on the tuning parameters were obtained and the most effective and easy-to-use control parameters were determined. An analysis of possible vibration drive tuning modes was conducted, implemented during its operation. It was found that by changing the rotor speed it is possible to obtain both low-frequency oscillations of the rotor center of mass in the entire possible range of amplitude, and high-frequency oscillations. In addition, with different values of the rotor disk diameter, in the vibration drive can regulate the vibration amplitude at a constant frequency. The compelling force created in a rotary vibration drive, at one same rotation frequency and equal in size and mass imensions of the rotor and mace, will be significantly greater in comparison with centrifugal vibration exciters. The adjustment of the directional shape of the rotor's center of mass trajectory implemented in the vibration drive is achieved without the use of additional masses and elastic elements. The vibration machine with the proposed rotary vibration drive will significantly increase the possibilities for creating optimal parameters of vibration fields in technological processes.

Keywords: vibration generator, vibrodrive, vibration machine, oscillation parameters, shape of oscillations.

Дата получения статьи: 25.04.2025
Дата принятия к публикации: 13.07.2025
Дата публикации: 25.09.2025

Date of manuscript reception: 25.04.2025
Date of acceptance for publication: 13.07.2025
Date of publication: 25.09.2025

Сведения об авторе:

Закиров Родион Габитович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры техники, технологий и строительства, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»,
e-mail: zakirovrg@susu.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4702-6561>

Author's information:

Rodion G. Zakirov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Engineering, Technology and Construction, South Ural State University (national research university), e-mail: zakirovrg@susu.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4702-6561>

1. Введение

Научный интерес к развитию вибрационной техники в последние годы неразрывно связан с повышением эффективности технологических процессов, в которых вибрационное воздействие позволяет существенно улучшить физико-химические и технико-экономические свойства обрабатываемых материалов, и в целом, качество изготавливаемой продукции. Для максимальной эффективности вибрационной техники сегодня необходимым становится создание не только оптимальных, но и что особенно важно, управляемых параметров вибрационных полей, позволяющие в полной мере учитывать физико-механические и реологические свойства различных обрабатываемых материалов. Разрабатываются новые и модернизируются действующие вибровозбудители и вибрационные машины, в которых можно настроить необходимые частоту, амплитуду и форму колебаний рабочего органа вибромашины, для обеспечения заданного технологического процесса в строительстве [1], в машино- и приборостроении [2], в нефтяной промышленности [3], в горнодобывающей промышленности и на предприятиях металлургических и химических производств [4]. Некоторые оригинальные вибрационные машины, основанные на использовании адаптивных методов воздействия на обрабатываемые материалы, рассматриваются в работе [5], где на основе создания управляемых вибрационных машин и технологий предлагается создать новую отрасль машиностроения – технологическое машиностроение.

В вибрационных машинах в качестве источника вибрации наиболее широко применяют инерционные (дебалансные и плане-

тарные) и электромагнитные вибровозбудители [6]. Инерционные дебалансные вибровозбудители позволяют в процессе эксплуатации регулировать амплитуду и форму колебаний изменением взаимного расположения самосинхронизирующихся дебалансов в многомассных конструкциях [7, 8], что связано с усложнением конструкции. В инерционных планетарных вибровозбудителях возможно только регулирование по амплитуде, которое достигается введением дополнительных эксцентрических масс на водиле, с возможностью изменения своего положения относительно нее [9]. Частота и форма колебаний в них задаются при проектировании геометрическими размерами бегунка и беговой дорожки [10]. Во всех инерционных вибровозбудителях регулировать частоту колебаний можно применением асинхронных электродвигателей с бесступенчатым и ступенчатым регулированием частоты вращения [11]. Электромагнитные вибровозбудители позволяют с помощью системы управления регулировать амплитуду колебаний (в пределах зазора между статором и якорем) за счёт плавного изменения силы тока в обмотках электромагнитов и частоту колебаний через частотный преобразователь [12]. Прямолинейные колебания якоря могут быть преобразованы только в винтовые колебания рабочего органа системой упругих элементов.

В Южно-Уральском государственном университете при исследовании причин разбивки и увода обрабатываемых на вертикально-сверлильном станке отверстий был выявлен эффект образования кинематической неуравновешенности вращаемого инструмента, прижатого к заготовке, вследствие чего возбуждались поперечные колебания центра сверла, приводящие к погрешностям

обработки. В продолжение исследования на основе выявленного эффекта был запатентован способ возбуждения колебаний и устройство для его осуществления, в котором геометрически уравновешенный ротор прижимают торцевой поверхностью к плоской поверхности регулируемой силой и вращают с постоянной угловой скоростью. Моделирование колебательных процессов в данном устройстве, названном роторным виброприводом с кинематически неуравновешенной массой, показало перспективные возможности регулирования в широком диапазоне частоты и амплитуды круговых колебаний центра масс ротора без изменения конструктивных элементов виброприводов [13]. Однако получение различных форм траекторий движения центра масс в планетарном виброприводе с кинематически неуравновешенной массой, также, как и в дебалансном вибровозбудителе, возможно только добавлением в колебательную систему дополнительной неуравновешенной массы. Создание колебательного процесса, в котором неуравновешенная масса в одномассном виброприводе будет двигаться по траектории, отличной от круговой, стало возможным благодаря разработке нового способа возбуждения колебаний [14], при котором плоская поверхность прижатия ротора была заменена прямой линией. В результате этого в системе образовались высшие кинематические пары «плоскость-линия» и «линия-точка», заменившие круговое движение центра масс движением по дугам противоположных секторов, точнее по контуру области пересечения двух окружностей равного диаметра.

2. Постановка задачи

Целью данной работы является моделирование динамических характеристик и анализ режимов управления в роторном виброприводе с кинематически неуравновешенной массой для выявления зависимостей между параметрами колебательных движений центра масс ротора с параметрами настройки вибропривода и выявления на их основе наиболее оптимальных способов управления параметрами и характером колебаний. При

этом регулирование вибропривода должно быть возможным при его применении в действующей вибрационной машине или установке.

3. Моделирование динамических характеристик

Для моделирования динамических характеристик роторного вибропривода с кинематически неуравновешенной массой составлены расчетные схемы работы вибропривода в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 1, 2) в установившемся режиме.

Вращающий момент от электродвигателя через шпиндель 5, установленный в подшипниковом узле 4, и упругую муфту 3 передается на вал ротора 1. На конце ротора установлен объемный диск диаметром D и массой m , торцом которого ротор прижат к ребру треугольной призмы 2 осевой силой $P_{ос}$. Схема связана с неподвижной прямоугольной системой координат xuz , в которой горизонтальная ось x проходит по верхнему ребру призмы, а вертикальная ось z направлена вдоль оси симметрии шпинделя. Ротор, вращаемый с постоянной угловой скоростью $\omega_{вр}$, в результате кинематической неуравновешенности [13] смещается от оси z и при этом сопрягается торцевой поверхностью диска с ребром призмы поочередно только в точках K_1 и K_2 , являющимися центрами вращения диска в плоскости xu в полупериодах I и II колебаний.

В момент, когда плоскость $ВОК$ ротора совпадает с плоскостью xz , центр масс ротора получает под действием центробежной силы

$$F_x = \frac{mD\omega_{вр}^2}{2}$$

максимальное смещение по оси x на величину ρ , определяемую из уравнения равновесия системы в плоскости xz :

$$\rho = \frac{D}{2jl} (m\omega_{вр}^2 l - P_{ос}).$$

где j – жесткость вала ротора; l – жесткость вала ротора.

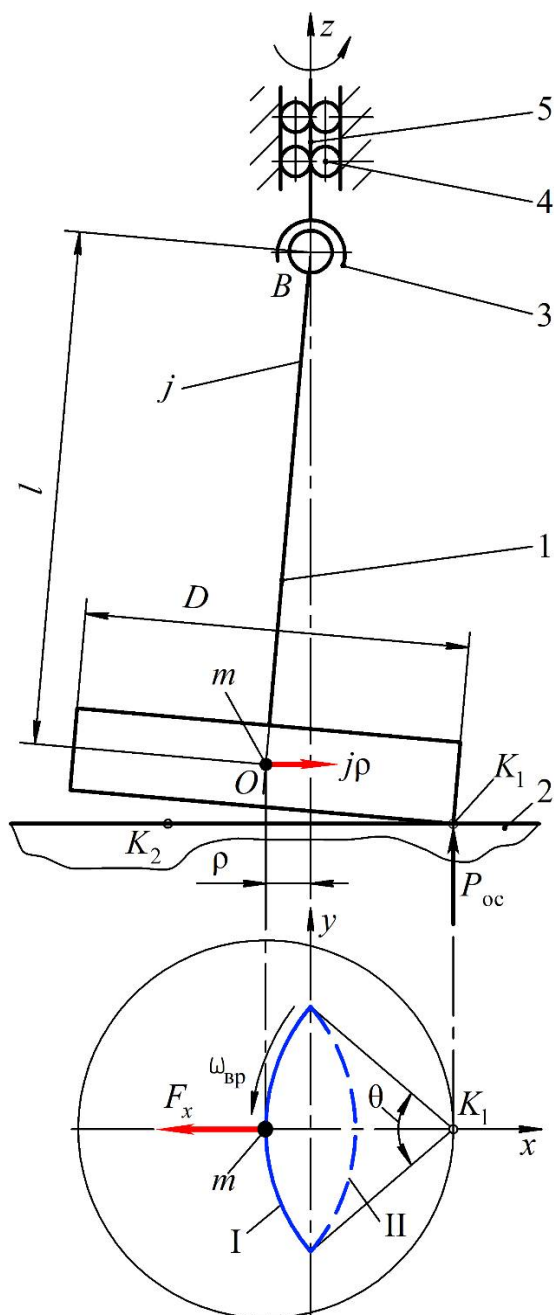


Рис. 1. Расчетная схема роторного вибропривода с кинематически неуравновешенной массой в плоскости xz

В момент, когда происходит смена точек касания K_1 и K_2 , ротор сопрягается торцевой поверхностью диска с ребром призмы по линии K_1 и K_2 и при этом под действием проекции центробежной силы F_y на ось y получает максимальное смещение (амплитуду) A по оси y , определяемую из уравнения равновесия системы в плоскости yz :

$$A = \sqrt{\rho(D - \rho)}.$$

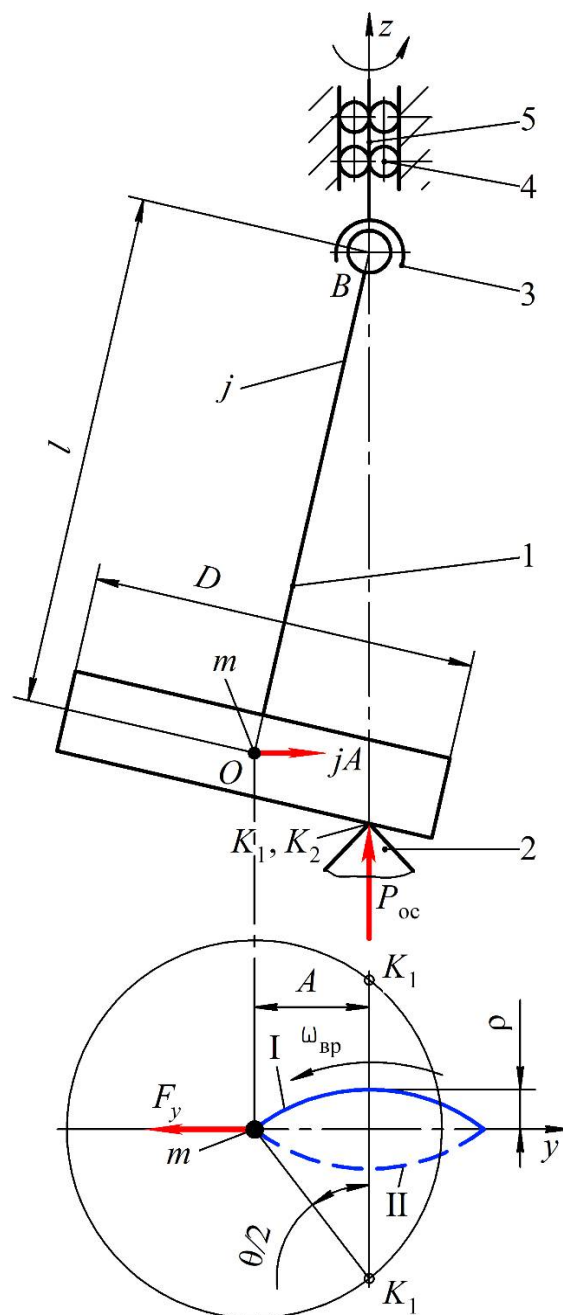


Рис. 2. Расчетная схема роторного вибропривода с кинематически неуравновешенной массой в плоскости yz

Получаемая форма траектории движения центра масс системы, позволяет считать исследуемый одномассный вибропривод, аналогичным двухмассным центробежным виброприводам направленного действия с эллиптической и прямолинейной формой колебаний.

Для направленных колебаний по оси x с амплитудой A , частота колебаний будет превышать частоту вращения ротора на отношение π/θ

$$\omega = \frac{\pi D \omega_{\text{вр}}}{4A}.$$

Амплитудное значение вынуждающей силы, создаваемой центром масс ротора по оси y , можно определить по выражению:

$$F_y = mA\omega^2.$$

Полученные теоретические зависимости динамических характеристик вибропривода позволяют с достаточной точностью проанализировать режимы управления ими с использованием графиков.

Управление параметрами и характером колебаний в роторном виброприводе с кинематически неуравновешенной массой в процессе его эксплуатации возможно параметрами настройки:

- 1) изменением частоты вращения ротора $\omega_{\text{вр}}$;
- 2) изменением величины осевой силы $P_{\text{ос}}$ прижатия призмы к ротору;
- 3) изменением диаметра D диска ротора.

Регулирование частоты вращения осуществляется системой управления электроприводом. Регулировка тарированной осевой силы прижатия выполняется изменением длины пружины сжатия передач «винт-гайка» вручную или с помощью гайковерта. Для изменения диаметра диска ротора предусматривается набор сменных дисков постоянной массы. Смена диска является более трудоемким из всех способов настройки.

В качестве исходных массогабаритных данных ротора для выполнения компьютерного моделирования использовались данные близкого по колебательному процессу глубинного виброуплотнителя модели ИВ-1-16 с диаметром, массой и длиной булав: 59 мм, 6,8 кг, 420 мм соответственно. Глубинный уплотнитель является одним из вариантов применения исследуемого вибропривода.

С помощью системы компьютерной алгебры Mathcad Prime [15] по представленным математическим моделям были построены графики зависимостей амплитуды A , частоты ω и вынуждающей силы F_y исследуемого вибропривода от управляющих параметров: $\omega_{\text{вр}}$; $P_{\text{ос}}$; D во всем возможном диапазоне изменений их значений. На рис. 3–5 представлены графические зависимости, объединенные по оси абсцисс со всеми параметрами настройки в равном по числовым значениям

приведенном диапазоне. Эти графики не дают полного представления о точных численных значениях управляемых параметров, в соответствии с осью ординат, но они точно показывают степень и характер влияния на них каждого из параметров настройки.

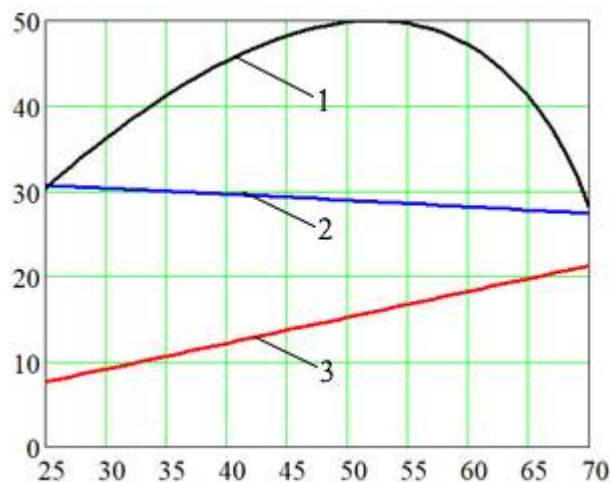


Рис. 3. Зависимости амплитуды A (мм)

колебаний ротора от:

1 — $\omega_{\text{вр}}$, с^{-1} ; 2 — $P_{\text{ос}}$, Н; 3 — D , мм

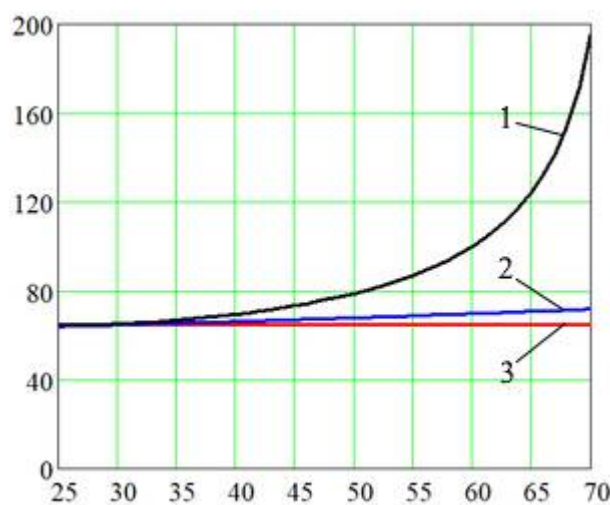


Рис. 4. Зависимости частоты ω (Гц)

колебаний ротора от:

1 — $\omega_{\text{вр}}$, с^{-1} ; 2 — $P_{\text{ос}}$, Н; 3 — D , мм

4. Анализ режимов управления

Влияние осевой силы $P_{\text{ос}}$ на параметры колебаний в роторном виброприводе с кинематически неуравновешенной массой, как видно из рис. 1–3, практически не существенно. Осевая сила важна для обеспечения установившегося режима колебаний при выбеге, а также служит для создания возвра-

щающего момента, ограничивающего наибольшее смещение центра масс ротора половиной диаметра диска ротора.

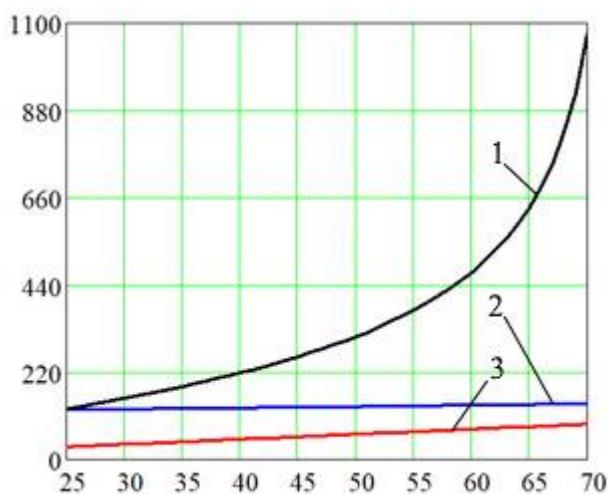


Рис. 5. Зависимости амплитуды вынуждающей силы F_y (Н) от: 1 – $\omega_{вр}$, c^{-1} ; 2 – $P_{ос}$, Н; 3 – D , мм

С увеличением диаметра диска ротора пропорционально увеличивается амплитуда колебаний, причем без изменения их частоты. Эта возможность существенно образом отличает исследуемый вибропривод от центробежных вибровозбудителей, в которых изменения частоты и амплитуды колебаний взаимосвязаны. Учитывая, что для замены диска ротора требуется разборка и сборка корпуса и ротора вибропривода, способ регулирования посредством изменения диаметра ротора является трудоемким и не столь эффективным. Однако, выявленный фактор независимости амплитуды и частоты позволяет разработать типоразмеры виброприводов с разными диаметрами диска ротора в пределах одного диапазона частот.

Наиболее заметно влияет на параметры колебаний частота вращения ротора, её изменение возможно даже без остановки вибропривода с помощью преобразователя частоты в схеме управления электропривода. Поэтому способ регулирования посредством изменения частоты вращения ротора остается основным при изменении режимов работы вибропривода. В частности, управляя частотой вращения ротора, можно получать разные размеры траектории колебательного движения центра масс ротора (рис. 6).

С увеличением частоты вращения на малых частотах происходит увеличение амплитуды колебаний вплоть до максимально возможного значения в системе. Дальнейшее увеличение частоты вращения вызывает снижение амплитуды, что свойственно всем инерционным источникам вибрации.

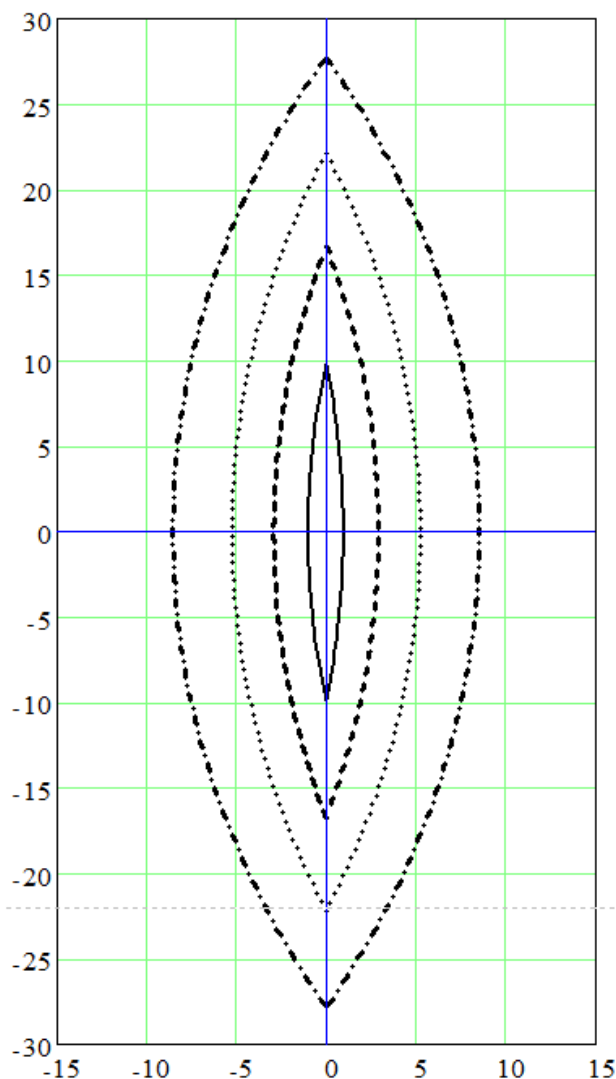


Рис. 6. Траектория колебательных движений центра масс ротора при: 1 – $\omega_{вр} = 12 c^{-1}$; 2 – $\omega_{вр} = 16 c^{-1}$; 3 – $\omega_{вр} = 20 c^{-1}$; 4 – $\omega_{вр} = 25 c^{-1}$

С увеличением частоты вращения увеличивается и вынуждающая сила вибропривода, которая при одной частоте вращения и равных массогабаритных размерах ротора и булав (дебаланса) в сравнении с центробежными вибровозбудителями будет значительно больше.

5. Заключение

Полученные аналитические и графические зависимости динамических характеристик роторного вибропривода с кинематически неравновешенной массой от параметров настройки, показывают, что изменением частоты вращения ротора можно получать как низкочастотные колебания центра масс ротора во всем возможном диапазоне амплитуды, так и высокочастотные колебания. Кроме того, при разных значениях диаметра диска ротора, в виброприводе возможна регулировка амплитуды колебаний при неизменяемой частоте. Вынуждающая сила, создаваемая в роторном виброприводе, при одной и

той же частоте вращения, равных габаритах и массах ротора и булавки будет существенно больше по сравнению с центробежными вибровозбудителями. При этом реализуемая в виброприводе направленная форма траектории центра масс ротора, достигается без применения дополнительных масс упругих элементов. Вследствие этого вибрационные машины с предлагаемым роторным виброприводом существенно расширят возможности создания оптимальных и управляемых параметров вибрационных полей в технологических процессах.

Список литературы

1. Денисов В.Н., Романенко М.В., Тилинин Ю.И. Технологии строительных процессов. В 3 частях. Часть 2. Надземный цикл. Санкт-Петербург: Лань, 2024. 236 с.
2. Сасов А.М. Система автоматического управления вибрационным бункерным загрузочным устройством // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 7. С. 111-118.
3. Гасымов Р.А., Искандеров М.Г., Манафов Э.К., Искандеров Н.И. Регулирование параметров электромагнитного вибратора для нефтяной промышленности // Нефть, газ и бизнес. 2015. № 9. С. 47-51.
4. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. Ростов-на-Дону: Изд-во центр ДГТУ, 2008. 693 с.
5. Сиваченко Л.А., Сиваченко Т.Л. Управляемые вибрационные машины и технологии – основа создания новой отрасли промышленности – технологического машиностроения // Вестник Белорусско-Российского университета. 2016. № 3(52). С. 74-85.
6. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти томах. Т. 4. Вибрационные процессы и машины / Под ред. Э.Э. Лавендела. М.: Машиностроение, 1981. 509 с.
7. Патент № 2671932 С1 Российская Федерация, МПК В06В 1/16. Способ

References

1. Denisov V.N., Romanenko M.V., Tilinin Yu.I. *Tekhnologii stroitelnykh protsessov. V 3 chastyah. CH. 2. Nadzemnyy tsikl* [Technologies of construction processes. In 3 parts. Part 2. Above-ground cycle]. Sankt-Peterburg, Lan, 2024. 236 p. (In Russian).
2. Sasov A.M. Automatic control system for vibration bunker loading device. *Izvestiya Tulsogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2019, No. 7, pp. 111-118. (In Russian).
3. Gasymov R.A., Iskanderov M.G., Manafov E.K., Iskenderov N.I. Regulation of parameters of electromagnetic vibrating screen for oil industry. *Neft, gaz i biznes*, 2015, No. 9, pp. 47-51. (In Russian).
4. Babichev A.P., Babichev I.A. *Osnovy vibratsionnoy tekhnologii* [Basics of Vibration Technology]. Rostov-n/D, Izdatelskiy tsentr DGTU; 2008. 693 p. [in Russian].
5. Sivachenko L.A., Sivachenko T.L. Controlled vibratory machines and technologies as the Basis for creating a new industry - processing machine-building. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta*, 2016, No. 3(52), pp. 74-85. (In Russian).
6. *Vibratsii v tekhnike: Spravochnik v 6-ti tomakh, T. 4: Vibratsionnye protsessy i mashiny* [Vibrations in Engineering. Handbook in 6 Vols. Vol. 4: Vibration Processes and Machines]. Lavendel E.E., Ed. Moscow,

регулирования параметров закона механических колебаний силовых факторов в центробежном вибровозбудителе / А.М. Васильев, А.Н. Стрелюхина, М.А. Потапова. – № 2017143860: заявл. 14.12.2017: опубл. 07.11.2018. – Бюл. № 31. – 35 с.

8. Zhang X., Wen B., Zhao C. Theoretical study on synchronization of two exciters in a nonlinear vibrating system with multiple resonant types // *Nonlinear Dynamics*. 2016. Vol. 85. №. 1. С. 141–154. DOI: 10.1007/s11071-016-2674-8.

9. Михеев В.В., Савельев С.В. Планетарный вибровозбудитель с регулируемыми характеристиками // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2018. Т. 6. №1. С. 98-104. DOI: 10.25206/2310-9793-2018-6-1-98-104.

10. Кузьмичев В.А. Основы проектирования вибрационного оборудования. Санкт-Петербург: Лань, 2014. 208 с.

11. Епифанов А.П., Малайчук Л.М., Гущинский А.Г. Электропривод. Санкт-Петербург: Лань, 2022. 400 с.

12. Пановко Г.Я. Динамика вибрационных технологических процессов. М., Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, Институт компьютерных исследований, 2019. 176 с.

13. Закиров Р.Г. Моделирование колебательных процессов в планетарных виброприводах с кинематически неуравновешенной массой // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2019. №2. С. 164-173. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-02-164-173.

14. Пат. 2476275 Российская Федерация, МПК⁷ B06 B 1/16. Способ возбуждения колебаний / С.В. Сергеев, Р.Г. Закиров, Б.А. Решетников. – № 2011132718/28; заявл. 03.08.2011; опубл. 27.02.2013. – Бюл. № 6. 15 с.

15. Воскобойников Ю.Е., Задорожный А.Ф. Основы вычислений и программирования в пакете MathCAD PRIME. Санкт-Петербург: Лань, 2018. 224 с.

Mashinostroyeniye, 1981. 509 p. [In Russian].

7. Patent RU 2671932. *Sposob regulirovaniya parametrov zakona mekhanicheskikh kolebaniy silovykh faktorov v tsentrobeznom vibrovzbuditele* [Method of adjusting parameters of law of mechanical oscillations of power factors in centrifugal vibration exciter]. Vasilev A.M., Strelyukhina A.N., Potapova M.A. Declared 14.12.2017. Published 07.11.2018. Bulletin No. 31.

8. Zhang X., Wen B., Zhao C. Theoretical study on synchronization of two exciters in a nonlinear vibrating system with multiple resonant types. *Nonlinear Dynamics*, 2016, Vol. 85. No. 1, pp. 141–154. DOI: 10.1007/s11071-016-2674-8.

9. Mikheyev V.V., Saveliev S.V. Planetary adjustable vibratory exciter with chain gear. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin*, 2018, Vol. 6. No. 1, pp. 98-104. DOI: 10.25206/2310-9793-2018-6-1-98-104. [In Russian].

10. Kuzmichev V.A. *Osnovy proektirovaniia vibratsionnogo oborudovaniya* [Fundamentals of vibration equipment design]. Saint Petersburg: Lan; 208 p. (In Russian).

11. Epifanov A.P., Malaychuk L.M., Gushchinskiy A.G. *Elektroprivod* [Electric drive] Sankt-Peterburg, Lan, 2022. 400 p. [In Russian].

12. Panovko G.Ya. *Dinamika vibratsionnykh tekhnologicheskikh protsessov* [Dynamics of vibration technological processes]. Moscow, *Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika, Institut kompyuternykh issledovaniy*, 2019. 176 p. [In Russian].

13. Zakirov R.G. Modeling of vibrational processes in planetary vibrodive with kinematically unbalanced mass. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No. 2, pp. 164-173. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-02-164-173. (In Russian)

14. Patent RU 2476275. *Sposob возбуждения колебаний* [Method for Oscillation Excitation]. Sergeyev S.V., Reshetnikov B.A., Zakirov R.G., Sergeev Yu.S. Declared 23.08.2011. Published 27.02.2013. Bulletin No. 6.

15. Voskoboynikov Yu.E., Zadorozhnyy

A.F. *Osnovy vychisleniy i programmirovaniya v pakete MathCAD PRIME*. [Basics of computing and programming in MathCAD PRIME]. Sankt-Peterburg, Lan, 2018. 224 p. (In Russian).

УДК (UDC) 625.084

ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ВРАЩЕНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА
КОМБИНИРОВАННОГО УПЛОТНЯЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ
АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙJUSTIFICATION OF THE DIRECTION OF ROTATION OF THE WORKING BODY OF
THE COMBINED SEALING EQUIPMENT FOR ASPHALT CONCRETE MIXTURESКазаков О.Ю.¹, Савельев А.Г.²
Kazakov O.Yu.¹, Saveliev A.G.²

- ¹ – АО Конструкторское бюро точного машиностроения им. А.Э. Нудельмана (Москва, Россия)
² – Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (Москва, Россия)
¹ – JSC Precision Engineering Design Bureau named after A.E. Nudelman (Moscow, Russian Federation)
² – Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI) (Moscow, Russian Federation)

Аннотация. В статье рассматривается следующий аспект работы разрабатываемого комбинированного уплотняющего оборудования для асфальтобетонных смесей: исследование и обоснование оптимального направления вращения рабочих органов с точки зрения качества готового покрытия. В качестве рассматриваемых рабочих органов предлагается использовать гладкие вальцы многократного воздействия, вращающиеся вокруг собственных осей с эксцентриситетом. Представленные данные и схемы дают наглядное представление о наиболее важных процессах и явлениях, влияющих на выброс материала перед рабочим органом и, как следствие, величину призмы волнообразования. Данный параметр выбран как показатель обеспечения качества готового покрытия. Разработан и сконструирован лабораторный стенд, позволивший провести ряд экспериментов по сформулированным методикам. Конструкция стенда, за счёт гибкости и широкого списка регулируемых параметров, позволяет провести глубокий анализ и наблюдение за работой уплотняющего органа в виде вальца со смещённой осью вращения. Проведено два эксперимента по пять повторений, результаты зафиксированы и систематизированы. Анализ полученных результатов подтверждает гипотезу о том, что уплотнение вращающимся рабочим органом следует производить от неуплотнённого материала к уплотнённому. Это позволит уменьшить количество дефектов покрытия (таких как трещины), повысит ровность и гладкость покрытия, а также снизит расслоение уплотняемого материала.

Ключевые слова: уплотнение асфальтобетона, комбинированное уплотняющее оборудование, лабораторный стенд.

Дата получения статьи: 21.05.2025
Дата принятия к публикации: 30.08.2025
Дата публикации: 25.09.2025

Abstract. The article deals with the following aspect of the work of the developed combined compacting equipment for asphalt concrete mixtures: research and substantiation of the optimal direction of rotation of working bodies from the point of view of the quality of the finished pavement. It is proposed to use smooth rollers of multiple impact rotating around their own axes with eccentricity as working bodies under consideration. The presented data and schemes give a visual representation of the most important processes and phenomena affecting the ejection of material in front of the working body and, as a consequence, the size of the wave formation prism. This parameter is chosen as an indicator of quality assurance of the finished coating. A laboratory bench was designed and constructed, which allowed to conduct a number of experiments on the formulated methods. The design of the stand, due to its flexibility and a wide list of adjustable parameters, allows for in-depth analysis and observation of the work of the compacting organ in the form of a roller with an offset axis of rotation. Two experiments with five repetitions each were conducted, and the results were recorded and systematized. The analysis of the obtained results confirms the hypothesis that compaction by rotating working body should be performed from the unconsolidated material to the compacted one. This will reduce the number of coating defects (such as cracks), increase the evenness and smoothness of the coating, and reduce the delamination of the compacted material.

Keywords: asphalt concrete compaction, combined compaction equipment, laboratory stand.

Date of manuscript reception: 21.05.2025
Date of acceptance for publication: 30.08.2025
Date of publication: 25.09.2025

Сведения об авторах:

Казakov Олег Юрьевич – инженер-конструктор 1 категории, АО Конструкторское бюро точного машиностроения им. А.Э. Нудельмана, *e-mail: 4informatika@mail.ru*.

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5747-6072.

Савельев Андрей Геннадьевич – доктор технических наук, профессор, профессор ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», *e-mail: prof.saveliev@yandex.ru*.

Authors' information:

Oleg Yu. Kazakov – design engineer 1 category, JSC Precision Engineering Design Bureau named after A.E. Nudelman, *e-mail: 4informatika@mail.ru*.

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5747-6072.

Andrey G. Saveliev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), *e-mail: prof.saveliev@yandex.ru*.

1. Введение

Создание высококачественных современных асфальтобетонных дорог является важным и приоритетным направлением развития сферы дорожного строительства Российской Федерации в связи с активным и повсеместным использованием. Значительный объем дорожного полотна в Российской Федерации обладает асфальтобетонным покрытием.

Одним из ключевых факторов, влияющих на прочностные характеристики готового покрытия (ровность, водостойкость, долговечность и т.п.) является процесс уплотнения асфальтобетонной смеси. Некачественное уплотнение (например появление разрушений структуры смеси) часто приводит к преждевременному разрушению покрытия, требующему финансовых затрат на ремонтные работы.

Уплотнение традиционно производится посредством дорожных катков различных разновидностей (гладковальцовые, вибрационные и т.п.). Однако поиск способов повышения качества и эффективности уплотнения является актуальным направлением для исследований. Активно идет развитие комбинированных рабочих органов и методов воздействия на смесь [1]. Особый интерес вызывает и исследование упруго-деформированного ленточного элемента (далее ленточный элемент) как способ распределения усилий со стороны рабочего органа [2]. Ряд работ также показывает потенциал поэтапного воздействия рабочих органов с финишным воздействием для выравнивания покрытия [3].

Как одно из возможных перспективных средств уплотнения асфальтобетонных смесей является разработанное автором комби-

нированное уплотняющее оборудование [4], где рабочими органами выступают ряд вальцов с эксцентриситетом, вращающихся вокруг собственных осей и оказывающих многократное воздействие на асфальтобетонную смесь. При этом, работа вальцов происходит между предварительным и финишным уплотнением опорными вальцами оборудования.

Ряд исследований уже заложил основы и понимание возможностей оборудования [5], однако многие аспекты работы требуют дополнительного глубокого исследования. Одним из важнейших направлений научной деятельности является определение оптимального направления вращения вальцов с точки зрения волнообразования материала как показатель качества покрытия. Основываясь на физике процесса, выдвигается гипотеза, что направление вращения от уплотненного материала к уплотненному и наоборот будет по-разному влиять на величину призмы волнообразования. На данный момент не существует исследований по данной теме для описываемого оборудования.

Актуальность исследований обусловлена рядом факторов:

- важностью качества уплотнения для повышения долговечности покрытия;
- перспективностью использования описываемого оборудования;
- пробелами в области знаний касательно оптимального направления вращения вальцов многократного воздействия;
- необходимостью проведения модельных экспериментальных исследований по теме для подтверждения теоретических предположений.

Целью исследования является определение оптимального направления вращения

валяца многократного воздействия для повышения качества готового покрытия.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- описать взаимодействие вальца с материалом и ленточным элементом, теоретически обосновав влияние направления вращения на качество покрытия;
- сформулировать методику проведения эксперимента; разработать и сконструировать лабораторный стенд для проведения экспериментов;
- собрать, систематизировать и проанализировать полученные данные;
- сделать выводы, сравнив экспериментальные данные с гипотезой.

2. Комбинированное уплотняющее оборудование

Разработанное уплотняющее оборудование является комбинированным за счёт сочетания многократного прокатывания и статического воздействий рабочих органов на асфальтобетонную смесь посредством ленточного элемента. Статическим воздействием является перекатывание вальцов по уплотняемому материалу, а циклическое прокатывание осуществляется за счёт вращения вальцов многократного воздействия вокруг собственных смещённых осей. При этом, воздействие на асфальтобетонную смесь происходит поэтапно в рамках одного про-

хода по участку покрытия вслед за асфальтоукладчиком.

Принципиальная схема комбинированного уплотняющего оборудования представлена на рис. 1.

На рисунке показаны следующие элементы: 1 – толкающий брус машины-носителя; 2 – крепёж-балансир; 3 – ведомый опорный валец; 4 – вспомогательный валец для поддержания ленты; 5 – рабочий уплотняющий орган в виде вальца многократного воздействия; 6 – рама; 7 – ленточный элемент; 8 – ведущий опорный валец; 9 – механизм натяжения ленточного элемента.

Ведомый валец соединён с устройством натяжения ленточного элемента. Вальцы многократного воздействия и ведущий валец имеют электропривод, расположение которых по отношению к уплотняемому материалу задаётся за счёт: угла наклона несущей рамы β , размеров $K_{1...2}$ и $T_{1...4}$.

Ведущим вальцом механизма перемещения ленточного элемента является тот, который первым входит в контакт с уплотняемым материалом. Это обосновано исследованиями уплотняющих рабочих органов [6]. Доказано, что ведущий валец позволяет добиться лучшего качества асфальтобетонного покрытия, чем ведомый, что обусловлено: снижением величины сдвиговых деформаций; уменьшением волнообразования перед вальцом.

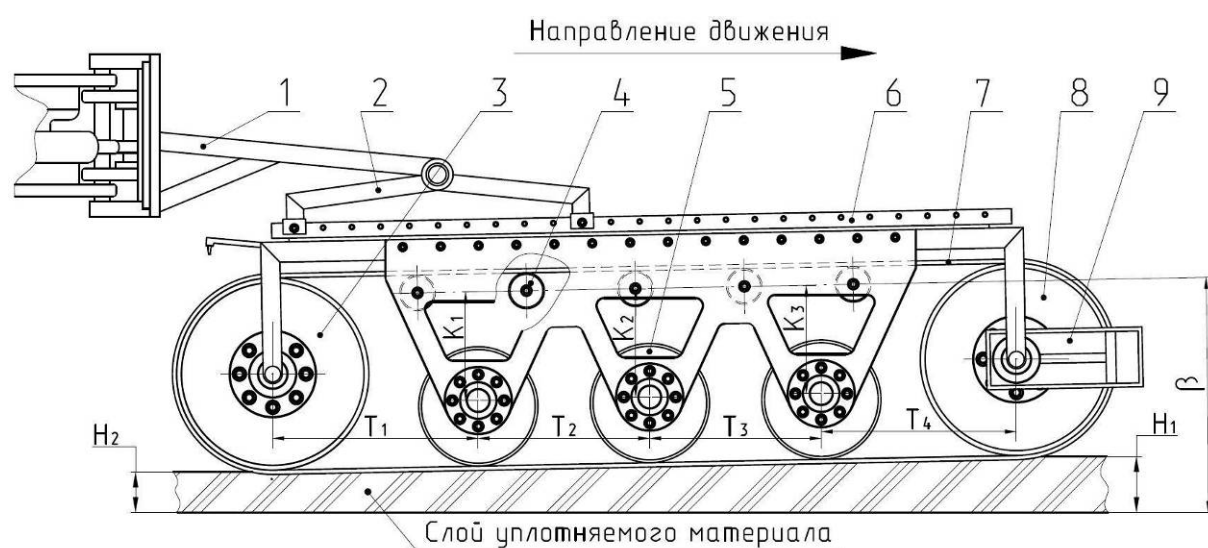


Рис. 1. Комбинированное уплотняющее оборудование



Рис. 2. Общий вид конструкции и рабочих органов комбинированного уплотняющего оборудования

Общий вид на рабочие органы также представлен на рис. 2.

Оборудование предназначено для поэтапного уплотнения асфальтобетона. Первым в контакт с материалом входит ведущий валец (позиция 8), осуществляя предварительное уплотнение с небольшой нагрузкой. Это обусловлено непрочными связями внутри смеси, нарушение которых может повлечь ряд дефектов (продольные и поперечные трещины, выбоины и т.д.).

Далее, ряд рабочих органов в виде валцов со смещенными осями вращения (позиция 5) осуществляют многократные прокатывающие воздействия, совершая основную работу по повышению плотности материала. При этом, каждый отдельно взятый валец установлен по отношению к поверхности асфальтобетонного покрытия на определенном расстоянии, задаваемом величиной $K_{1...3}$. Это позволяет добиться желаемой плотности материала путем регулирования высоты расположения вальца и, соответственно, усилия воздействия на смесь.

Вальцы осуществляют работу посредством ленточного элемента (позиция 7), поддерживаемого вспомогательными вальцами (позиция 4). Ленточный элемент обернут вокруг рабочих органов и опорных валцов, а его натяжение регулируется механизмом натяжения (позиция 9). После основного воздействия ряда вращающихся валцов осуществляется финишное уплотнение при помо-

щи опорного вальца (позиция 3), сглаживая возможные неровности [7].

Одним из основных преимуществ описываемого подхода к уплотнению является возможность повышения коэффициента уплотнения асфальтобетонной смеси за один проход, перемещая комбинированное оборудование вслед за асфальтоукладчиком. Смесь не успевает остыть и повышение коэффициента уплотнения осуществляется в оптимальных температурных условиях [8]. При классическом же подходе выложенная асфальтоукладчиком смесь подвергается многократному циклическому укатыванию катком, что занимает какое-то время, в течение которого асфальтобетон теряет структурно-механические свойства.

Роль используемого в конструкции комбинированного оборудования ленточного элемента в уплотнении асфальтобетонной смеси подробно рассмотрена [9]. Преимущества и особенности возвратно-поступательного циклического уплотнения также рассматривались в некоторых работах [10].

Однако, ввиду новизны предлагаемого подхода к уплотнению существует необходимость в экспериментальных исследованиях, подтверждающих работоспособность комбинированного оборудования, учитывая особенности протекающих процессов.

3. Вращение вальца многократного воздействия с эксцентриситетом

Качество готового покрытия является комплексным и многогранным понятием, поэтому для данного исследования в качестве определяющего параметра выбрана величина призмы волнообразования, которая образуется перед рабочим органом в процессе уплотнения [11].

Для определения оптимального направления вращения вальца многократного воздействия вокруг смещенной оси необходимо определить усилия и их направления по отношению к ленточному элементу и асфальтобетонной смеси. Привод вальца может осуществлять его вращение в двух направлениях:

- 1) валец подминает под себя уплотняемый материал;
- 2) валец выталкивает материал со стороны уплотненной части.

На рис. 3 показан 1-й вариант.

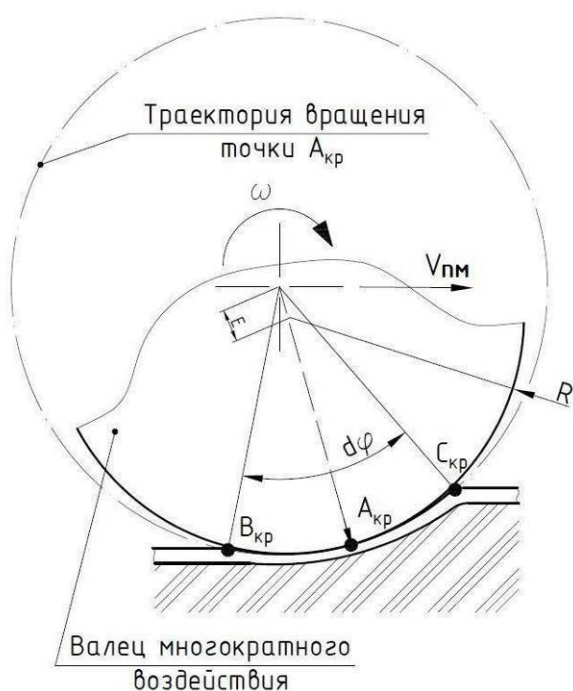


Рис. 3. Схема прокатывания крайней точки по длине пятна контакта

Рассмотрим валец многократного воздействия. Он обладает крайней точкой вращения вокруг собственной оси, характеризующей максимальное давление на уплотняемый

материал, а значит и на ленточный элемент. Что обусловлено эксцентриситетом оси вращения.

Соответственно, крайняя точка прокатывается от точки к по направлению вращения вальца многократного воздействия по собственной траектории вращения, характеризующей максимальную степень деформации ленточного элемента в период контакта с ним.

Воспринимая вращение точку вальца многократного воздействия как равномерное движение материальной точки по окружности, возможно составить следующую схему (рис. 4).

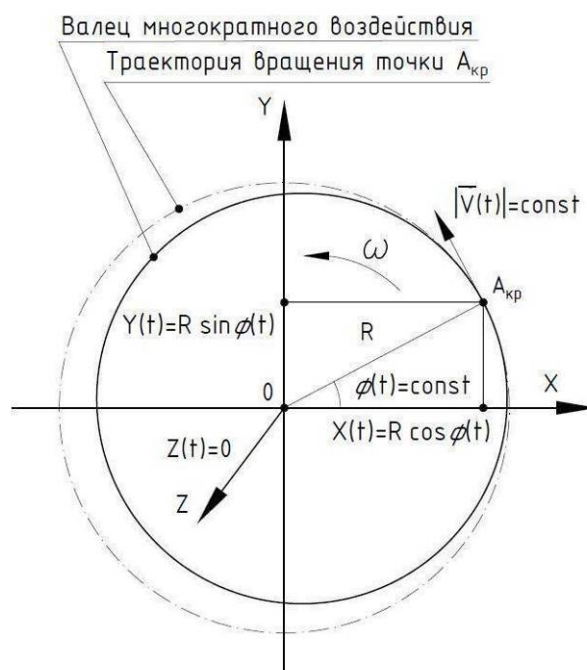


Рис. 4. Вращения точки вальца многократного воздействия

При подобном рассмотрении происходящих процессов, становится возможным записать уравнения движения в прямоугольной инерциальной системе координат XYZ. При этом, точка вращается вокруг оси, её движение происходит в плоскости XY, тогда как её координата в плоскости Z всегда равно 0.

Угол между радиус вектором точки, проведённым из начала координат (точки 0) и осью X зависит от времени t. Движение точки является равномерным, значит и описан-

ный угол изменяется с постоянной угловой скоростью.

Модуль вектора скорости и ускорения точки постоянны. Следовательно, ускорение точки постоянно по модулю, а выведенные уравнения скорости и ускорение равномерно движущейся материальной точки показывают зависимость от постоянной угловой скорости.

Соответственно, при направлении усилий со стороны крайней точки вальца многократного воздействия от неуплотненного материала к уплотненному возможно уменьшение призмы волнообразования. Что достигается за счет приложения максимальных усилий со стороны вальца (а именно, со стороны точки), направленных под рабочих орган. Это обусловлено тем, что асфальтобетонная смесь типа Гх является пористой структурой из щебня, песка и порошка, связанных битумом как вяжущим. Соответственно, частицы смеси должны многократно продвигаться под валец и в дальнейшем подвергаться дополнительному уплотнению. Что также должно способствовать повышению прочности готового покрытия.

4. Лабораторный стенд для модельных экспериментов изучения вальца многократного воздействия

Условия эксперимента соответствуют лабораторным с использованием стенда. Исследования являются воспроизводимыми, а наличие контрольных параметров, рассмотренных далее, позволяет получить более предсказуемые результаты.

Перед созданием стенда необходимо определить критерии подобия модели. Расчет параметров модели и индикаторы подобия исходя из ожидаемых параметров оригинала возможно благодаря научным трудам в области [12].

В данном исследовании рассматривается уплотнение тонких слоев материала, исходя из того, что:

- моделируется уплотнение дорожного покрытия, толщина которого часто варьируется от 50 до 150 мм;

- исследование предполагает определение влияния параметров и режимов работы уплотняющего органа путём выявления призмы волнообразования перед рабочим органом;

- лабораторные эксперименты подразумевают масштабирование как слоя материала, так и рабочего органа;

- используемый в ходе экспериментов материал моделирует холодную песчаную смесь типа Гх, характерную для верхних слоев покрытия;

- в исследовании не рассматриваются процессы уплотнения глубоких слоев покрытия и связанные с этим процессы.

Линейный масштаб модели примем равным 0,7. Укажем основные параметры оригинала и модели:

вес вальца оригинала 167 Н, модели - 82 Н; рабочая поступательная скорость движения модели и оригинала 0,0167 м/сек; мощность двигателя оригинала 571 Вт, модели - 280 Вт; угловая скорость вращения вальца модели и оригинала 15,2 1/с; ширина вальца оригинала 1,5 м, модели - 0,3 м; радиус вальца оригинала 0,3 м, модели - 0,21 м; толщина ленточного элемента оригинала 17 мм, модели - 5 мм; вязкость уплотняемого материала оригинала 10^3 Па·с, модели - 17^3 Па·с.

В качестве уплотняемого материала для моделирования холодной песчаной асфальтобетонной смеси типа Гх при проведении экспериментальных исследований применялась смесь песка и масел. Полученный материал обладал следующими параметрами: сцепление материала от 0,7 до 0,8 кг/см²; угол внутреннего трения от 28 до 32°; угол внешнего трения от 18 до 21°; объёмный вес 2 г/см³.

Параметры уплотняемого материала для проведения исследований позволяют моделировать реальную холодную песчаную асфальтобетонную смесь типа Гх, используемую при дорожном строительстве. Соответственно, полученные в дальнейшем результаты применимы для полевых условий.

Разработанный стенд освещался в ряде публикаций и представляет из себя неподвижную конструкцию с подвижной частью, на которой закреплен рабочий орган [13, 14,

15]. На рис. 5 показаны состав и основные элементы стенда.

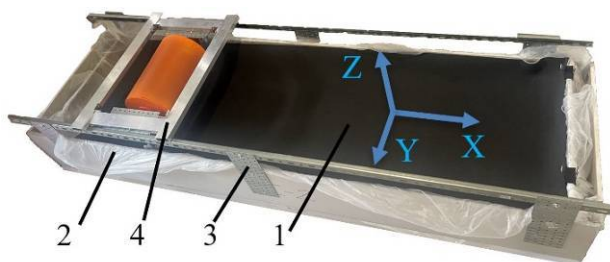


Рис. 5. Основные элементы лабораторного стенда

На рисунке показаны следующие элементы: 1 – регулируемая по высоте емкость для размещения уплотняемого материала; 2 – корпус; 3 – подвижная конструкция; 4 – рабочий орган в виде вальца многократного воздействия со смещенной осью вращения.

Конструкция стенда позволяет регулировать высоту расположения основания (позиция 1) для уплотняемого материала по отношению к основанию корпуса. В дополнение к этому, сам рабочий орган в виде вальца может быть отрегулирован в вертикальной оси Z за счёт переустановки болтовых соединений опор подвижной конструкции. Перемещение по оси X осуществляется за счёт электролебедки, перемещающей подвижную конструкцию вместе с рабочим органом вдоль уплотняемого материала.

На рис. 6 представлена подвижная часть лабораторного стенда со смонтированным вальцом многократного воздействия (рабочим уплотняющим органом). Показан метод закрепления подвижной конструкции при помощи особо прочного шнура с латунированным стальным сердечником и полимерным покрытием. Скольжение конструкции вдоль основания стенда осуществляется посредством подшипников, помещенных внутрь стальных направляющих и металлических опорных труб, расположенных сверху.

Валец, показанный на рис. 7 имеет эксцентриситет равный 10 мм. С одной стороны его ось вращения закреплена к муфте электромотора, а с другой в блок подшипника. Рабочая поверхность вальца в виде трубы может свободно вращаться относительно ос-

тальной части конструкции рабочего органа. Что обеспечивает возможность прокатывания вальца по внутренней части ленточного элемента, не приводя к его смещению и повреждению.

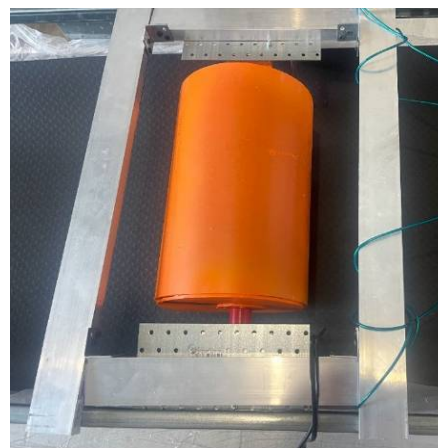


Рис. 6. Общий вид подвижной части с вальцом многократного воздействия с закрепленным шнуром электролебедки и подключенным питанием электромотора



Рис. 7. Модель вальца многократного воздействия шириной 300 мм и диаметром 210 мм

Валец осуществляет циклические многократные нагрузки при одновременном движении вдоль уплотняемого участка материала. Данное перемещение с постоянной скоростью осуществляется за счёт перемещения подвижной конструкции со смонтированным рабочим органом при помощи электролебедки.

Таким образом, симулируется поступательное движение комбинированного уплотняющего оборудования вслед за асфальтоукладчиком. Ограниченная регулировка расположения вальца по оси Y также присутствует

и осуществляется за счёт монтажа болтовых соединений в иные конструктивные отверстия.

Лабораторный стенд позволяет проводить широкий ряд исследований рабочего органа комбинированного уплотняющего оборудование. В том числе, возможно осуществление эксперимента по определению оптимального направления вращения вальца.

Подготовка эксперимента проводится при каждом повторении эксперимента и включает в себя следующее: подготовка материала к уплотнению, осуществление предварительного уплотнения, выравнивания поверхности и толщины слоя; расположение ленточного элемента на подготовленный слой материала для повышения распределения усилий со стороны вальца; выставление рабочего органа в изначальное положение (подвижная конструкция сложена до конечной точки), обеспечение расположения смещённой оси с эксцентриситетом в заданных начальных координатах.

Перемещение подвижной конструкции стенда с закрепленным рабочим органом в виде вальца многократного воздействия со смещенной осью вращения осуществлялся при помощи электролебедки.

На рис. 8 представлена иллюстрация схемы эксперимента (в зависимости от эксперимента направление вращения вальца может меняться).

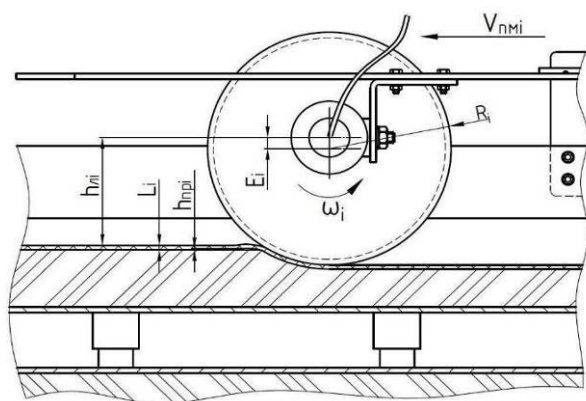


Рис. 8. Схема эксперимента по определению оптимального направления вращения вальца многократного воздействия

На рисунке указаны следующие параметры: R_i – радиус вальца; E_i – величина эксцентриситета; ω_i – угловая скорость вращения

вальца; $V_{\text{лн}i}$ – поступательная скорость подвижной конструкции стенда; $h_{\text{лн}}$ – расстояние от оси вращения вальца до внутренней поверхности ленточного элемента (данное расстояние обусловлено возможностью контроля значения параметра в процессе исследований без демонтажа ленты); L_i – толщина

ленточного элемента; $S_{\text{пр}i}$ – высота призмы.

Ряд параметров стенда был постоянен в процессе экспериментов, а именно: радиус вальца $R = 105$ мм; постоянная скорость движения подвижной конструкции составляет 15 мм/с; толщина полотна ленточного элемента $L = 5$ мм; частота вращения вальца $N = 1,75$ об/сек; эксцентриситет вальца $E = 10$ мм; расстояние от внутренней части ленточного элемента до оси вращения вальца $h_{\text{л}} = 100$ мм.

Эксперименты проводились в двух независимых сериях по 5 повторений в каждом для повышения достоверности результатов и снижения случайной погрешности. Первая серия экспериментов проводилась при вращении вальца от неуплотненного материала к уплотненному (против часовой стрелки, если смотреть на рис. 9). Вторая серия экспериментов проводилась от уплотненного к неуплотненному (по часовой стрелке).

Измерению подвергалась образовавшаяся в результате воздействия рабочего органа призма волнообразования: высота по отношению к неуплотненному слою материала; площадь сечения, вычисление которое производилось путем аппроксимации формы призмы на элементарные фигуры (рис. 9).

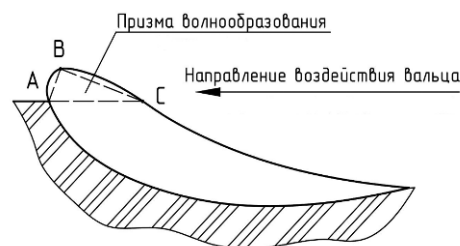


Рис. 9. Пример аппроксимации геометрии призмы волнообразования на простую фигуру (треугольник ABC)

Ширина заполненного уплотняемый материалом канала равна 60 см. Толщина слоя смеси составляет 50 мм, поверх которого укладывается и фиксируется зажимами (от смещений при работе вальца) ленточный элемент (рис. 10) толщиной 5 мм.



Рис. 10. Размещение ленточного элемента поверх материала

В качестве ленточного элемента применялась силиконовая резина со следующими параметрами: твёрдость 30 ± 3 Шор А; плотность $0,8 \text{ г/см}^3$; условная прочность от 5 до 7 МПа; термостойкость от 200 до 250°; относительное удлинение от 300 до 400%; толщина 5 мм.

5. Экспериментальные данные

На рис. 11 показан пример призмы волнообразования, которая образовалась после

воздействия рабочего органа. Для осуществления измерений величины призмы требуется удаление ленточного элемента и перемещение рабочего органа в изначальное положение.



Рис. 11. Призма волнообразования и измерения посредством штангенциркуля

Участок 1 показывает уплотненное покрытие, подвернувшейся воздействию вальца. На участке 2 располагается сама призма волнообразования, которая образуется перед рабочим органом за счёт выдавливания и волнообразования частиц смеси. Значения плотности и осадки материала на участке 3 соответствуют изначальным, так как рабочий орган не оказывал воздействия на эту часть покрытия.

Результаты повторений для каждой серии представлены в табл. 1.

Низкие значения коэффициента вариации показывают приемлемую воспроизводимость результатов в рамках одной серии повторений эксперимента.

Таблица 1

Экспериментальные данные

Направление вращения	Параметр	Номер повторения					Среднее значение	Коэффициент вариации, %
		1	2	3	4	5		
От неуплотненного материала к уплотненному	$h_{пр}, \text{ мм}$	2,1	2,5	2	2,6	2,3	2,3	10,87

	$S_{при}$, мм ²	23,5	28,7	25,1	26,8	26,9	26,2	7,67
От уплотненного материала к неуплотненному	$h_{при}$, мм	3,5	4,1	3,6	3,9	3,9	3,8	6,58
	$S_{при}$, мм ²	33,6	42,8	37,2	40,5	36,4	38,1	9,11

Полученные значения показывают незначительную погрешность в зависимости от номера повторения в рамках серии экспериментов. Что косвенно подтверждает надёжность и достоверность лабораторного стенда.

Результаты показывают, что вращение вальца многократного воздействия от неуплотненного материала к уплотненному (против часовой стрелки) по сравнению с вращением от уплотненного материала к неуплотненному (по часовой стрелке) приводит к уменьшению величины призмы волнообразования уплотняемого материала: среднее значение уменьшилось на 39,47% (с 3,8 до 2,3 мм); среднее значение уменьшилось на 31,23% (с 38,1 до 26,2 мм²).

6. Заключение

Проведенные модельные эксперименты по определению величины призмы волнообразования в зависимости от направления вращения вальца показали следующее.

Вращение вальца многократного воздействия со смещенной осью является предпочтительным, когда воздействие крайней точки в направлении от неуплотненного материала к уплотненному. Это объясняется снижением величины призмы волнообразования и, как следствие, возможным повышением качества готового асфальтобетонного покрытия.

Анализируя полученные результаты можно сделать следующие выводы. Направление вращения вальца действительно влияет на волнообразование материала перед собой в процессе работы вальца. С физической точки зрения это объясняется направлением приложения усилия крайней части вальца к материалу. Если оно направлено под валец (от неуплотненного материала), то рабочий орган проталкивает и подминает вещество под себя. Это приводит к заглублению частиц, а не к их выталкиванию перед вальцом.

При вращении в оптимальном направлении ожидается повышение качества уплотнения, увеличение долговечности и снижение количества и объемов дефектов асфальтобетонного покрытия.

Выбранные параметры для оценки в виде высоты и площади призмы объективно могут показать величину выброшенного перед вальцом материала. Эти величины косвенно показывают ровность покрытия, степень расслоения материала и количество дефектов. Кроме того, измерение значений высоты и площади возможно при помощи штангенциркуля, избегая использование специальных инструментов, что повышает доступность и простоту исследований процесса уплотнения.

Полученные экспериментальные данные полностью согласуются с выдвинутой в начале статьи гипотезой.

Результаты и выводы можно экстраполировать на реальные полевые условия ввиду того, что модель станда разработана с учетом критериев подобия, а уплотняемый материал соответствует реальным характеристикам холодной асфальтобетонной песчаной смеси типа Гх.

Практическая значимость результатов заключается в возможности проектирования комбинированного уплотняющего оборудования с учетом оптимального направления вращения рабочих органов в виде гладких вал-

цов многократного воздействия для повышения качества уплотнения. Научная же значимость заключается в возможности использования методики и результатов экспериментов в дальнейших исследованиях по теме.

В качестве рекомендации к дальнейшим исследованиям можно сформулировать увеличение масштабов исследования, проведение модельных экспериментов в полевых условиях с макетом комбинированного уплотняющего оборудования с использованием опыта актуальных исследований [16, 17].

Список литературы

1. Курбатов Н.Е. Определение параметров уплотняющего оборудования ударно-укатывающего действия: дис. ... канд. техн. наук. М.: МАДИ, 1990. 203 с.

2. Кустарев Г.В., Павлов С.А. Анализ процесса качения цилиндра по уплотняемой поверхности через упругий элемент // Наука и техника в дорожной отрасли. 2009. № 2. С. 36-37.

3. Дорожный каток / М.В. Дудкин, Е.М. Алексеевский, Н.Е. Курбатов, Е.Л. Дудкина, Ю.В. Разумов. – Патент на изобретение № 1717692. Заявл. 02.04.1990. Опубл. 07.03.1992, Бюл. № 9.

4. Устройство для уплотнения горячих асфальтобетонных смесей и грунтов / О.Ю. Казаков, Г.В. Кустарев. – Патент на полезную модель № 194303. Заявл. 18.07.2019, № 2019122624. Опубл. 05.12.2019, Бюл. № 34.

5. Казаков О.Ю. Усовершенствование технологий уплотнения катка в отряде для скоростной укладки асфальта // 21 century: fundamental science and technology XXII: Proceedings of the Conference. North Charleston, 3-4.02.2020, Vol. 1 Morrisville, NC, USA: LuluPress, 2020, 73-75 p.

6. Хархута Н.Я. Вопросы теории уплотнения дорожных покрытий // Уплотнение земляного полотна и конструктивных слоев дорожных одежд. Союздорнии. М., 1980. С. 64-72.

7. Казаков О.Ю., Кустарев Г.В. Выявление особенностей применения устройства для уплотнения горячих асфальтобетонных смесей и грунтов // Всероссийская научно-практическая конференция «Молодежь и

References

1. Kurbatov N.E. Determination of parameters of compacting equipment of impact-rolling action. Diss. Cand. Sci. (Engineering). Moscow: MADI, 1990. 203 p. (In Russian)

2. Kustarev G.V., Pavlov S.A. Analysis of the cylinder rolling process on a compacted surface through an elastic element. *Nauka i tekhnika v dorozhnoi otrasli*. 2009. No. 2, pp. 36-37. (In Russian)

3. Patent SU 1717692. *Dorozhnyy katok* [Road roller]. Dudkin M.V., Alekseevskiy E.M., Kurbatov N.E., Dudkina E.L., Razumov Yu.V. Declared 02.04.1990. Published 07.03.1992. (In Russian)

4. Patent RU 194303. *Ustroystvo dlya uplotneniya goryachikh asfal'tobetonnykh smesey i gruntov* [Device for compaction of hot asphalt concrete mixtures and soils]. Kazakov O.Yu., Kustarev G.V. Declared 18.07.2019. Published 05.12.2019. (In Russian)

5. Kazakov O.Yu. Improvement of roller compaction technology in a team for high-speed asphalt paving. *21 Century: Fundamental Science and Technology XXII: Proceedings of the Conference*. North Charleston, 3-4.02.2020, Vol. 1. Morrisville, NC, USA: LuluPress, 2020, pp. 73-75.

6. Kharkhuta N.Ya. Issues of the theory of road surface compaction. Compaction of Earth Embankments and Structural Layers of Road Pavements. *Soyuzdornii*. Moscow, 1980, pp. 64-72. (In Russian)

7. Kazakov, O.Yu., Kustarev, G.V. Identification of features of the use of a device for compaction of hot asphalt concrete mixtures and soils. *All-Russian Scientific and Practical*

наука: от исследовательского поиска к продуктивным решениям»: Материалы конференции. Иркутск, 2020. Т. 1. С. 20-23.

8. Liu N., Liu L., Li M., Sun L. A comprehensive review of warm-mix asphalt mixtures: mix design, construction temperatures determination, performance and life-cycle assessment. // *Road Materials and Pavement Design*. 2023. Vol. 25. N. 11. P. 1381-1425.

9. Павлов С.А. Определение параметров уплотняющего оборудования с применением упруго-деформируемого ленточного элемента: дис. ... канд. техн. наук. М.: МАДИ, 2017. 185 с.

10. Туманян С.Б. Определение параметров и режимов работы уплотняющего оборудования с комбинированным воздействием на уплотняемую среду: дис. ... канд. техн. наук. М.: МАДИ, 1994. 166 с.

11. Беляев К.В., Серебренников В.С. Укладка и уплотнение асфальтобетонных смесей. Теория и расчет. Омск: СиБАДИ, 2015. 208 с.

12. Баловнев В.И. Подобие и моделирование в системе проектирования дорожно-строительных машин. М.: МАДИ, 2014. 148 с.

13. Казаков О.Ю., Кустарев Г.В. Методика конструирования лабораторного стенда для изучения уплотняющего рабочего органа катка // Междунар. конф. молодых ученых и студентов «Современные техника и технологии в научных исследованиях»: Мат. конф. Бишкек, 2020. С. 383-387.

14. Казаков О.Ю., Кустарев Г.В. Экспериментальный стенд и методика для исследования рабочего органа катка // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2019. Т. 16. № 4 (68). С. 408-415.

15. Казаков О.Ю., Кустарев Г.В. Описание опыта проектирования лабораторного стенда для исследования рабочего органа катка // Московская междунар. межвуз. научно-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных «Подъёмно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы»: Материалы конференции. М., 2020. С. 278-280.

16. Shi Z., Min Z., Chen F., Huang W. Mi-

† *Conference «Youth and Science: From Research Search to Productive Solutions»: Conference Proceedings, Irkutsk, 2020, Vol. 1, pp. 20–23. (In Russian)*

† 8. Liu N., Liu L., Li M., Sun L. A comprehensive review of warm-mix asphalt mixtures: mix design, construction temperatures determination, performance and life-cycle assessment, *Road Materials and Pavement Design*, 2023, Vol. 25, No. 11, pp. 1381-1425.

† 9. Pavlov S.A. Determination of parameters of compaction equipment using an elastic-deformable band element. Diss. Cand. Sci. (Eng.). Moscow. 2017. 185 p. (In Russian)

† 10. Tumanyan S.B. Determination of parameters and operating modes of compaction equipment with combined impact on the compacted medium. Diss. Cand. Sci. (Eng.), spec. 05.05.04. Moscow. 1994. 166 p. (In Russian)

† 11. Belyaev K.V., Serebrennikov V.S. *Ukladka i uplotnenie asfaltobetonnykh smesei. Teoriya i raschet* [Laying and compaction of asphalt concrete mixtures. Theory and calculation]: study guide. Omsk, SibADI, 2015. 208 p. (In Russian)

† 12. Balovnev V.I. *Podobie i modelirovanie v sisteme proektirovaniya dorozhno-stroitelnykh mashin* [Similarity and modeling in the design system of road construction machines]. Moscow: MADI, 2014. 148 p. (In Russian)

† 13. Kazakov O.Yu., Kustarev G.V. Experimental stand and methodology for the working element of the roller. *Int. Conf. of Young Scientists and Students «Modern Technology and Engineering in Scientific Research»*, Bishkek, 2020, pp. 383-387. (In Russian)

† 14. Kazakov O.Yu., Kustarev G.V. Experimental stand and method for studying the roller working tool. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 2019, Vol. 16, No. 4 (68), pp. 408-415. (In Russian)

† 15. Kazakov, O.Yu., Kustarev, G.V. Description of the design experience of a laboratory stand for studying the working body of a roller. *Moscow Int. Interuniv. Scientific and Technical Conf. "Lifting-Transport, Construction, Road, Track Machines and Robotic Systems": Conf. Proc.* Moscow, 2020, pp. 278–280.

croscopic quantitative analysis of the blending characteristics of epoxy asphalt-aged asphalt and its performance evaluation // *Construction and Building Materials*. 2025. Vol. 467. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.140389.

17. Zhao M., Liu Y., Xu X., Pei Y., Zhang C., Wu C. Advancements in asphalt pavement recycling: Integrating falling weight impact signals for enhanced rehabilitation efficiency // *Case Studies in Construction Materials*. 2025. Vol. 22. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e04312.

† 16. Shi Z., Min Z., Chen F., Huang W. Microscopic quantitative analysis of the blending characteristics of epoxy asphalt-aged asphalt and its performance evaluation, *Construction and Building Materials*, 2025, Vol. 467. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.140389.

† 17. Zhao M., Liu Y., Xu X., Pei Y., Zhang C., Wu C. Advancements in asphalt pavement recycling: Integrating falling weight impact signals for enhanced rehabilitation efficiency, *Case Studies in Construction Materials*, 2025, Vol. 22. doi: 10.1016/j.cscm.2025.e04312.

УДК (UDK) 621.877.3

ВИБРОЗАЩИТНЫЕ СИСТЕМЫ СИДЕНИЙ ОПЕРАТОРОВ С ДВУХСЕГМЕНТНОЙ
КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ СТАТИЧЕСКОЙ СИЛОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙVIBRATION PROTECTION SYSTEMS FOR OPERATOR SEATS WITH
TWO-SEGMENT PIECEWISE-LINEAR STATIC FORCE CHARACTERISTICКорытов М.С., Кашапова И.Е., Щербаков В.С.
Korytov M.S., Kashapova I.E., Sherbakov V.S.Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (Омск, Россия)
Siberian State Automobile and Highway University (Omsk, Russian Federation)

Аннотация. Наземные транспортно-технологические машины в процессе работы подвержены значительным вибрациям и ударным воздействиям. Поэтому актуальна задача защиты их операторов от указанных воздействий. В работе исследовались негармонические импульсные воздействия на систему сиденья с оператором в виде перемещения вверх или вниз с постоянной скоростью, которое начинается в нулевой момент времени из состояния покоя системы. Осуществлялась модельная вычислительная проверка сделанного предположения о том, что виброзащитная система сиденья с несимметричной силовой характеристикой способна обеспечить лучшую защиту по сравнению с системами с симметричной силовой характеристикой. В исследуемой одномассовой системе сиденья на виброзащитной подвеске с одной поступательной степенью свободы, использовалась кусочно-линейная двухсегментная силовая характеристика с различными углами наклона сегментов в положительной и отрицательной областях значений локальной координаты деформаций виброзащитного механизма. Асимметричное кинематическое возбуждение движения системы выполнялось путем придания основанию в начальный момент линейного движения в вертикальном направлении с постоянной скоростью. В вычислительном эксперименте варьировались коэффициенты наклона сегментов статической силовой характеристики в положительной и отрицательной областях значений локальной координаты. В качестве показателя оценки эффективности защиты использовалось максимальное скорректированное ускорение сиденья. Осреднение показателя проводилось для подъема и опускания основания сиденья с одинаковой скоростью. Проведено сравнение виброзащитных систем с односегментной и двухсегментной силовыми характеристиками. Приведены функциональные зависимости максимального скорректированного ускорения от средних максимальных деформаций виброзащитного механизма сиденья, для расчетных случаев подъема и опускания основания. Подтверждено предположение о преимуществе виброзащитных систем с несимметричной силовой характеристикой. При небольших внешних воздействиях снижение макси-

Abstract. Ground transport and technological machines are exposed to significant vibrations and impacts during operation. Therefore, the task of protecting their operators from these effects is relevant. In this work, we investigated non-harmonic impulse effects on the seat system with the operator in the form of upward or downward movement with a constant speed, which begins at zero time from the rest state of the system. A model computational verification of the made assumption that the vibration protection system of the seat with an asymmetric force characteristic is capable of providing better protection compared to systems with a symmetric linear static force characteristic was carried out. In the studied single-mass vibration protection system of the seat on the vibration protection suspension with one translational degree of freedom, a piecewise linear two-segment force characteristic with different angles of inclination of the segments in the positive and negative areas of the values of the local coordinate of deformations of the vibration protection mechanism was used. Asymmetric kinematic excitation of the system motion was performed by giving the base a linear motion in the vertical direction at a constant speed at the initial moment. In the computational experiment, the slope coefficients of the static force characteristic segments in the positive and negative ranges of the local coordinate values were varied. The maximum corrected acceleration of the seat was used as an indicator for assessing the effectiveness of protection. The indicator was averaged for raising and lowering the seat base with the same speed. Vibration protection systems with single-segment and two-segment force characteristics were compared. Functional dependencies of the maximum corrected acceleration on the average maximum deformations of the vibration protection mechanism of the seat are given for the calculated cases of raising and lowering the base. The assumption about the advantage of vibration protection systems with an asymmetric force characteristic is confirmed. With small external impacts, the decrease in the maximum corrected acceleration is insignificant, with an increase in external impacts it is more significant.

мального скорректированного ускорения незначительно, при возрастании внешних воздействий более существенно.

Ключевые слова: виброзащита, виброизоляция, максимальное скорректированное ускорение, двухсегментная, характеристика.

Дата получения статьи: 20.04.2025
Дата принятия к публикации: 05.06.2025
Дата публикации: 25.09.2025

Сведения об авторах:

Корытов Михаил Сергеевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автомобильный транспорт», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», e-mail: kms142@mail.ru.
ORCID: 0000-0002-5104-7568

Кашапова Ирина Евгеньевна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Автоматизация и энергетическое машиностроение», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», e-mail: kashapova_ie@mail.ru.
ORCID: 0000-0002-0631-564X

Щербakov Виталий Сергеевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизация и энергетическое машиностроение», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», e-mail: sherbakov_vs@sibadi.org.
ORCID: 0000-0002-3084-2271

Keywords: vibration protection, vibration isolation, maximum adjusted acceleration, two-segment, characteristic.

Date of manuscript reception: 20.04.2025
Date of acceptance for publication: 05.06.2025
Date of publication: 25.09.2025

Authors' information:

Mikhail S. Korytov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at Department of Automobile transport, Siberian State-Impact Automobile and Road University (SibADI), e-mail: kms142@mail.ru.
ORCID: 0000-0002-5104-7568

Irina E. Kashapova – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer at Department of Automation and power engineering, Siberian State-Impact Automobile and Road University (SibADI), e-mail: kashapova_ie@mail.ru.
ORCID: 0000-0002-0631-564X

Vitaliy S. Sherbakov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at Department of Automation and power engineering, Siberian State-Impact Automobile and Road University (SibADI), e-mail: sherbakov_vs@sibadi.org.
ORCID: 0000-0002-3084-2271

1. Введение

Наземные транспортно-технологические машины, в том числе строительные и дорожные машины, имеют тенденцию к непрерывному увеличению мощности, производительности, скорости перемещения и т.д. В связи с этим возрастает необходимость обеспечения защиты узлов машин и операторов от возникающих вибраций и ударных воздействий [1 - 3].

Силовые и кинематические воздействия на ходовые элементы и рабочие органы машин со стороны опорной поверхности и обрабатываемых сред, характеризуются переменными значениями и сменой знака перемещения, скорости, ускорения и силы [4, 5].

Большие вибрации и ударные воздействия уменьшают срок службы таких узлов машин, как трансмиссия, рабочие органы и ходовые элементы, снижают надежность и

эффективность работы машин. Но наибольший вред вибрации и ударные воздействия наносят операторам, вызывая у них профессиональные заболевания, снижая внимание и работоспособность операторов [6, 7]. В конечном итоге это приводит к снижению производительности и точности работ, выполняемых строительными и дорожными машинами [8 - 10]. Применение систем виброзащиты кабин [11] и сидений операторов [12] позволяет снизить уровень вибрационных и ударных воздействий на операторов. При этом виброзащитные системы сидений взаимодействуют непосредственно с операторами, поэтому являются наиболее важной составляющей виброзащиты.

Активные [13] и пассивные [14] виброзащитные системы сидений операторов, отличаясь друг от друга по признаку использования внешней энергии, могут реализовывать различные статические силовые характери-

стики, в том числе нелинейные и кусочно-линейные.

При низкочастотных и ударных воздействиях на основание сиденья, наряду с общепринятым показателем ускорения сиденья, используются другие показатели оценки эффективности виброзащиты, такие, например, как сила реакции со стороны опорной поверхности на сиденье с оператором [15]. Сила реакции со стороны опоры в каждый момент времени, при соблюдении условия отсутствия отрыва, может быть определена как произведение массы объекта на сумму ускорений: ускорения объекта в неподвижной системе координат и ускорения свободного падения $g = 9.81 \text{ м/с}^2$. Целесообразно для сравнительного анализа, в частности, при негармонических воздействиях импульсного и ступенчатого типа, использовать параметр максимального скорректированного ускорения. Это позволит проводить сравнение сидений с различной массой оператора.

Текущее значение скорректированного ускорения в каждый момент времени в динамике может быть вычислено без использования значения массы сиденья, по формуле

$$a_g(t) = g + a(t), \quad (1)$$

где $a(t)$ – текущее значение ускорения сиденья с оператором в неподвижной системе координат.

Максимальное значение скорректированного ускорения, достигаемое в течении рассматриваемого переходного процесса, обозначим $a_{g\max}$.

Предложенный параметр $a_{g\max}$ при низкочастотных и ударных воздействиях позволяет количественно оценить воздействие на оператора. Например, при движении сиденья с оператором вниз в неподвижной системе координат с ускорением, равным ускорению свободного падения, текущее значение параметра a_g будет нулевым. Это соответствует реальной ситуации, когда оператор фактически находится в невесомости, в свободном падении вместе с сиденьем, и сила воздействия на тело оператора со стороны сиденья равна нулю. В то же время, при использовании не подвергнутого коррекции значения ускорения в неподвижной системе координат a , в том же расчетном случае текущее

ускорение оператора вместе с сиденьем будет сравнительно большим, 9.81 м/с^2 , при фактическом отсутствии силового воздействия. Поэтому использование показателя $a_{g\max}$ вместо $a_{\max}$, будет более информативным.

2. Постановка задачи исследований

Было выдвинуто предположение о том, что виброзащитная система сиденья оператора с несимметричной силовой характеристикой обеспечивает меньшее значение $a_{g\max}$, в частности, при негармонических воздействиях ударного импульсного или ступенчатого типа.

Необходимо исследовать на эффективность виброзащитную систему сиденья операторов с несимметричной силовой характеристикой при негармоническом воздействии.

Была описана и исследована одномассовая виброзащитная система сиденья с оператором, имеющая одну вертикальную поступательную степень свободы (рис. 1, а) и наиболее простой вид несимметричной статической силовой характеристики – кусочно-линейный двухсегментный (рис. 1, б). Подобные характеристики могут быть реализованы не только в активных, но и в пассивных виброзащитных системах с помощью комбинации двух упругих элементов, например, пружин сжатия, каждая из которых имеет ограниченный ход.

Предлагается использовать асимметричное кинематическое возбуждение данной системы:

$$y_{op} = f(t).$$

В целях снижения вычислительной сложности, предлагается, чтобы воздействие характеризовалось одним параметром. Это упростит решение задач анализа и синтеза.

Требуется с использованием известной математической модели провести исследование отклика описываемой системы на кинематическое возбуждение и подтвердить выдвинутую гипотезу.

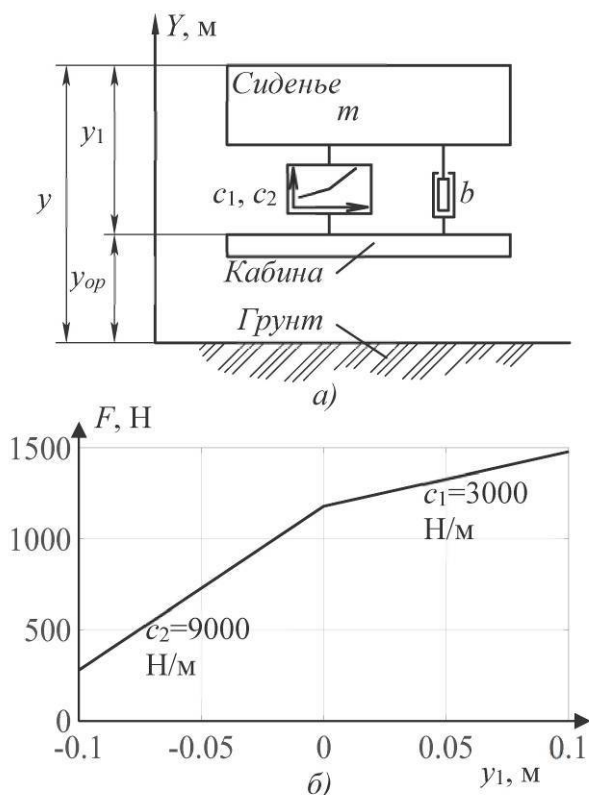


Рис. 1. Расчетная схема исследуемой виброзащитной системы сиденья (а) и пример ее кусочно-линейной двухсегментной статической силовой характеристики (б)

3. Математическая модель

В математической модели рассматриваемой системы (рис. 1) сосредоточенная масса виброзащищаемого объекта сиденья с оператором имеет величину m и обладает одной поступательной степенью свободы относительно основания сиденья, т.е. пола кабины. Абсолютная вертикальная координата массы в неподвижной системе координат, т.е. относительно грунта, обозначена y , относительная координата деформации виброзащитного механизма сиденья относительно собственного равновесного положения обозначена y_1 . Модель включает в себя также демпфер с постоянным коэффициентом демпфирования b , и силовой механизм, обеспечивающий заданную кусочно-линейную двухсегментную статическую силовую характеристику $F=f(y_1)$:

$$F(y_1) = c \cdot y_1, \quad (2)$$

где $F(y_1)$ – сила упругости, действующая со стороны силового механизма виброзащитной системы на сиденье с оператором; c – переменный, в данном случае, коэффициент жесткости, значения которого задаются по условиям:

$$c = \begin{cases} c_1 & \text{при } y_1 > 0; \\ c_2 & \text{при } y_1 \leq 0. \end{cases} \quad (3)$$

Также в модели использовалось обозначение: y_{op} – координата основания сиденья, т.е. пола кабины оператора, в неподвижной системе координат. Временная зависимость указанной координаты является входным или внешним воздействием в используемой модели.

Координаты сиденья и его основания связаны зависимостью

$$y_1 = y - y_{op}. \quad (4)$$

Динамика системы, расчетная схема которой приведена на рис. 1, а, описывается нелинейным (разрывным) дифференциальным уравнением второго порядка [14]:

$$m \cdot \ddot{y} + b \cdot \dot{y}_1 + F(y_1) = 0, \quad (5)$$

где $\ddot{y} = a(t)$.

Одной и двумя точками в дифференциальном уравнении (5) обозначены первая и вторая производные координат по времени.

В уравнении (5) и в выражении статической силы (2) не учитывалось слагаемое силы тяжести $m \cdot g$, поскольку известно, что сила тяжести не влияет на характер колебаний виброзащищаемой массы. Происходит только смещение точки равновесия механизма на постоянную величину [14]. В то же время, при определении значения показателя оценки воздействия на оператора по (1), ускорение свободного падения учитывалось.

Заданное кинематическое возбуждение колебаний системы в виде перемещения основания сиденья, может описываться различными функциями. Например, общепринятым является использование гармонической синусоидальной функции перемещения основания [14].

В настоящей работе использовалось кинематическое возбуждение виброзащитной системы в виде перемещения основания сиденья с постоянной скоростью v_c . Переме-

щение основания начиналось сразу после нулевого момента времени моделирования, и продолжалось в течении рассматриваемого переходного процесса:

$$\begin{cases} \dot{y}_{op}(t \leq 0) = 0; y_{op}(t \leq 0) = 0; \\ \dot{y}_{op}(t > 0) = v_c; y_{op}(t > 0) = v_c \cdot t. \end{cases} \quad (6)$$

Начальными условиями моделирования являлись нулевые значения координаты основания сиденья и ее первой производной:

$$\dot{y}_{op}(t=0) = 0; y_{op}(t=0) = 0. \quad (7)$$

То есть, перемещение основания в нулевой момент времени и до нулевого момента отсутствовало, система находилась в статическом равновесии.

Дифференциальное уравнение (5), разрешенное относительно абсолютного ускорения сиденья с оператором, принимает вид

$$\ddot{y} = -\frac{F(y_1) + b \cdot \dot{y}_1}{m}. \quad (8)$$

При представлении уравнения (8) в форме Коши, т.е. в виде системы из двух дифференциальных уравнений первого порядка, данная система может быть решена известными численными методами [14, 16].

Для оценки эффективности виброзащитной системы в [14] используется параметр $\ddot{y}_{\max}$ – максимальное абсолютное ускорение сиденья в неподвижной системе координат, достигаемое во время переходного процесса.

Большой информативностью при описываемом воздействии обладает показатель среднего значения максимального ускорения сиденья $\bar{\ddot{y}}_{\max}$, определенный как среднее арифметическое двух значений $\ddot{y}_{\max}$ для расчетных случаев подъема и опускания основания с одинаковой по модулю скоростью.

В настоящей работе использовался показатель $\bar{a}_{g\max}$ на основе скорректированного ускорения a_g : среднее значение максимального скорректированного ускорения сиденья $\bar{a}_{g\max}$. Он определялся как среднее арифметическое двух значений максимального скорректированного ускорения $a_{g\max}(+v_c)$ и $a_{g\max}(-v_c)$ для расчетных случаев подъема и опускания основания сиденья с одинаковой по абсолютному значению скоростью: $\pm v_c$:

$$\bar{a}_{g\max} = \frac{a_{g\max}(+v_c) + a_{g\max}(-v_c)}{2}. \quad (9)$$

Использование показателя $\bar{a}_{g\max}$ (9) подразумевает равную вероятность подъема и опускания основания сиденья с одной и той же скоростью, что близко к реальным условиям движения машины по случайному микрорельефу опорной поверхности при сохранении горизонтальности макрорельефа.

4. Результаты экспериментов

В серии вычислительных экспериментов, проводимых на описываемой математической модели, коэффициенты наклона двух сегментов статической силовой характеристики c_1 и c_2 варьировались каждый в диапазоне от 1000 до 10000 Н/м с шагом 1000 Н/м. Рассматривались все возможные сочетания двух значений указанных коэффициентов.

Прочие параметры динамической системы сиденья на подвижном основании с виброзащитной подвеской принимали фиксированные значения: масса $m=120$ кг, коэффициент демпфирования $b=200$ Н/(м/с). Конечное время моделирования составляло 5 с во всех расчетных случаях. Абсолютная скорость перемещения основания сиденья v_c принимала два значения: 0,1 м/с и 1 м/с.

На рис. 2, а приведены в качестве примера две сравниваемые статические силовые характеристики: односегментная с одним значением коэффициента $c=7000$ Н/м, изображенная пунктирной линией, и двухсегментная с двумя значениями коэффициентов: $c_1=10000$ Н/м при $y_1 \geq 0$ и $c_2=5000$ Н/м при $y_1 < 0$, изображенная сплошной линией. Для приведенной на рис. 2, а односегментной характеристики с $c=7000$ Н/м, на рис. 2, б приведен пример временных зависимостей координаты основания сиденья $y_{op}(t)$ и абсолютной координаты сиденья $y(t)$ при подъеме основания со скоростью $v_c=1$ м/с.

На рис. 2, в, г приведены временные зависимости параметров виброзащитной системы с односегментной характеристикой с коэффициентом $c=7000$ Н/м при скоростях подъема и опускания основания сиденья со скоростью $v_c=\pm 1$ м/с соответственно. На рис.

2, в – временные зависимости локальной координаты собственной деформации виброзащитного механизма $y_1(t)$, а на рис. 2, г –

соответствующие им временные зависимости скорректированного ускорения сиденья $a_g(t)$.

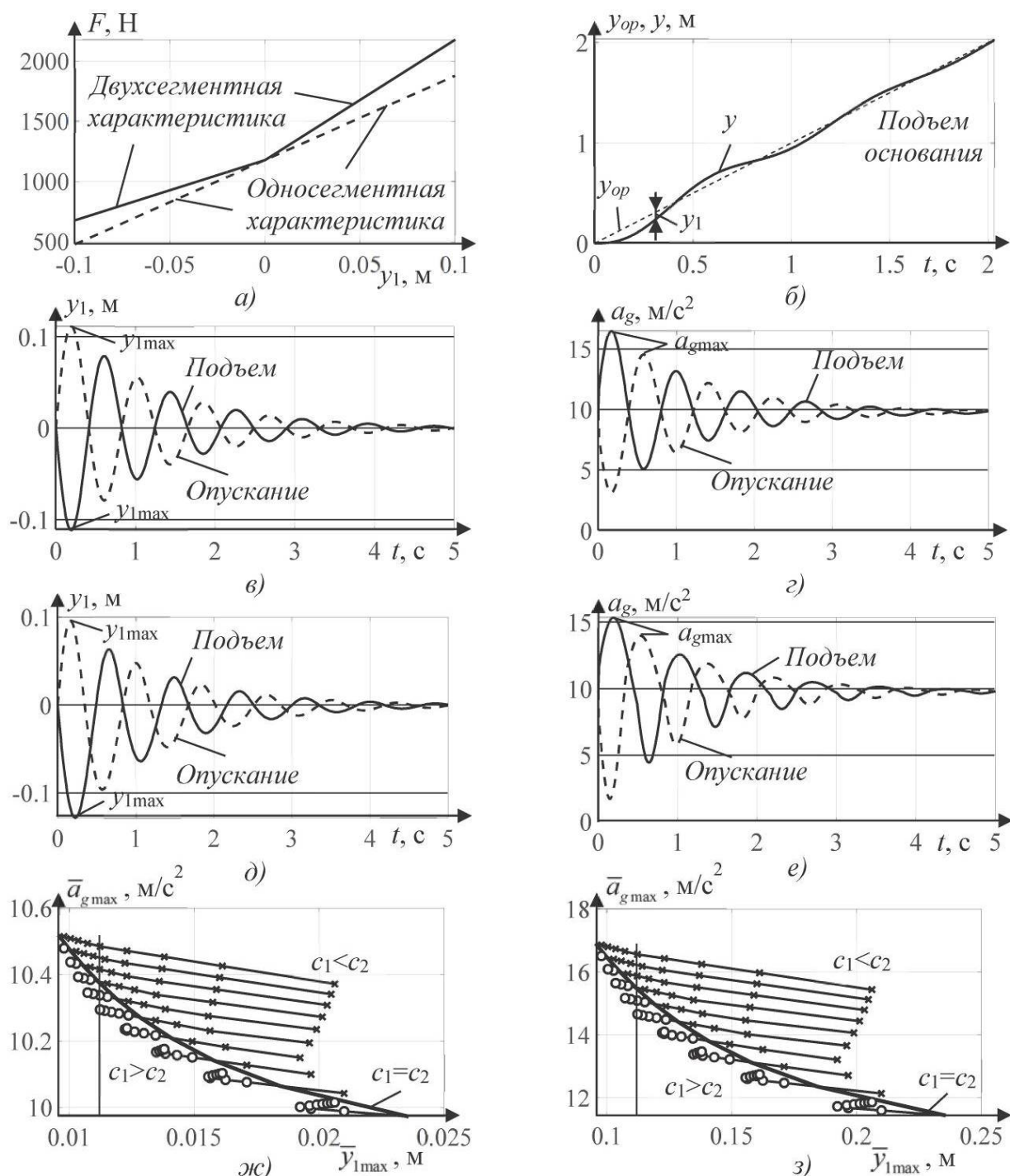


Рис. 2. Примеры двухсегментной и односегментной статических силовых характеристик виброзащитной системы (а), временных зависимостей абсолютных координат основания и сиденья (б), локальной координаты деформации механизма (в, д), скорректированного ускорения (з, е), функциональных зависимостей средних максимальных скорректированных ускорений сиденья от средних максимальных деформаций механизма (ж, з)

На рис. 2, д, е приведены аналогичные временные зависимости $y_1(t)$ и $a_g(t)$ соответ-

ственно, полученные при тех же условиях, но для виброзащитной системы с двухсег-

ментной характеристикой с коэффициентами $c_1=10000$ Н/м; $c_2=5000$ Н/м (рис. 2, а).

На рис. 2 ж, з приведены обобщающие функциональные зависимости значений средних максимальных скорректированных ускорений сиденья $\bar{a}_{g\max}$ от средних максимальных деформаций механизма $\bar{y}_{1\max}$. Скорость перемещения основания при вычислении значений $\bar{a}_{g\max}$, приведенных на рис. 2, ж составляла $v_c=\pm 0.1$ м/с. При вычислении значений $\bar{a}_{g\max}$ на рис. 2, з, указанная скорость принимала значения $v_c=\pm 1$ м/с.

Средняя максимальная деформация механизма определялась по зависимости, аналогичной (8), как среднее арифметическое максимальных абсолютных значений деформаций или отклонений локальной координаты виброзащитного механизма от равновесного положения $y_{1\max}(+v_c)$ и $y_{1\max}(-v_c)$, для двух расчетных случаев соответственно, подъема и опускания основания сиденья с одинаковой по абсолютному значению скоростью: $\pm v_c$:

$$\bar{y}_{1\max} = \frac{y_{1\max}(+v_c) + y_{1\max}(-v_c)}{2}. \quad (9)$$

Максимальная деформация $y_{1\max}$ в каждом расчетном случае перемещения определялась как максимальное достигаемое в переходном процессе абсолютное значение y_1 :

$$y_{1\max} = \max(|y_1|). \quad (10)$$

На рис. 2 ж, з тонкими наклонными линиями соединены точки с одним и тем же значением c_2 . Жирной линией соединены также точки функции, полученные при условии $c_1=c_2$.

5. Обсуждение результатов

Круглыми маркерами О-образной формы на рис. 2 ж, з обозначены точки функции $\bar{a}_{g\max}$, полученные при условии $c_1>c_2$. Маркерами Х-образной формы на тех же рисунках обозначены точки, полученные при условии $c_1<c_2$. Все точки функции на рис. 2 ж, з, полученные при условии $c_1>c_2$, располагаются ниже жирной линии, соответствующей односегментной статической силовой харак-

теристике. А все точки функции, полученные при условии $c_1<c_2$, располагаются выше жирной линии, соответствующей односегментной характеристике.

Видно, что на рис. 2 ж, з графики имеют весьма близкую друг к другу форму, отличающуюся масштабом по вертикальной оси. Вертикальные тонкие линии на рис. 2 ж, з, в качестве примера, пересекают горизонтальную ось аргумента при значении средних максимальных деформаций механизма $\bar{y}_{1\max}=0,0112$ м (рис. 2, ж) и $\bar{y}_{1\max}=0,112$ м (рис. 2, з). Указанным значениям средних максимальных деформаций механизма соответствуют две точки на каждом из рис. 2, ж, з: $c=c_1=c_2=7000$ Н/м (верхняя точка пересечения тонкой вертикальной линии и жирной наклонной линии) и $c_1=10000$ Н/м, $c_2=5000$ Н/м (нижняя точка пересечения тонкой вертикальной линии и одной из тонких наклонных линий). Приведенные значения коэффициентов c_1 и c_2 , соответствуют двум приведенным на рис. 2, а статическим силовым характеристикам: двухсегментной исследуемой и односегментной традиционной.

Сравнение значений двух точек на рис. 2, ж: [$\bar{y}_{1\max}=0,0112$ м; $\bar{a}_{g\max}=10,379$ м/с²] для системы с односегментной характеристикой и [$\bar{y}_{1\max}=0,0112$ м; $\bar{a}_{g\max}=10,294$ м/с²] для системы с двухсегментной характеристикой, показывает, что использование системы с двухсегментной характеристикой снижает значение показателя $\bar{a}_{g\max}$ на величину менее 1 %.

На рис. 2, з аналогичные две точки функции имеют координаты [$\bar{y}_{1\max}=0,112$ м; $\bar{a}_{g\max}=15,5$ м/с²] для системы с односегментной характеристикой и [$\bar{y}_{1\max}=0,112$ м; $\bar{a}_{g\max}=14,649$ м/с²] для системы с двухсегментной характеристикой. Имеет место снижение значение показателя $\bar{a}_{g\max}$ на 5,5 %.

6. Заключение

На основе расчетной схемы виброзащитной системы оператора с одной вертикальной поступательной степенью свободы ис-

следована математическая модель динамической системы, включающей в себя подвижное основание, массу сиденья с оператором, виброзащитный механизм с одним постоянным коэффициентом демпфирования и двумя различными коэффициентами жесткости при положительном и отрицательном значениях локальной координаты деформации механизма.

Способ внешнего воздействия на виброзащитную систему, в виде начинающегося в нулевой момент времени перемещения основания с постоянной скоростью, позволил определить среднее значение максимальных скорректированных ускорений сиденья при подъеме и опускании основания сиденья с одинаковой по абсолютной величине скоростью. Коррекция значения ускорения сиденья с оператором выполнялась путем прибавления постоянной величины ускорения свободного падения. Параметр оценки на основе скорректированных ускорений не зависит от массы объекта. Среднее значение максимальных скорректированных ускорений сиденья при подъеме и опускании основания, при предложенном способе внешнего воздействия, а также при низкочастотных периодических воздействиях, позволил дать оценку воздействия на оператора со стороны сиденья. В отличие от нескорректированных значений ускорения сиденья в неподвижной системе координат.

По результатам вычислительного эксперимента было подтверждено предположение о том, что виброзащитная система сиденья с несимметричной силовой характеристикой способна обеспечить лучшую защиту оператора от силовых воздействий по сравнению с виброзащитной системой, которая имеет симметричную линейную односегментную статическую силовую характеристику.

Установлено, что исследуемая виброзащитная система с кусочно-линейной двух-

сегментной статической силовой характеристикой может обеспечивать меньшие значения показателя оценки по сравнению с виброзащитной системой с односегментной характеристикой, но только в случае превышения значения коэффициента пропорциональности правой части характеристики, над значением коэффициента левой части характеристики. Правая часть характеристики соответствует смещению сиденья вверх, а левая – вниз, относительно номинального среднего положения виброзащитного механизма.

При небольших величинах внешних воздействий, например, при скорости основания 0,1 м/с, среднее значение максимальных скорректированных ускорений сиденья системы с двухсегментной характеристикой по сравнению с традиционной снижается незначительно, на величину менее 1 %. Однако при возрастании величин внешних воздействий, например, при скорости основания 1,0 м/с, среднее значение максимальных скорректированных ускорений сиденья снижается уже более существенно, на 5,5 %.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что при описываемом воздействии импульсного типа, виброзащитные системы с несимметричной силовой характеристикой не уступают традиционным виброзащитным системам с симметричной линейной характеристикой, и даже показывают незначительное преимущество.

Направлением дальнейших исследований может являться поиск более сложной нелинейной формой несимметричной статической силовой характеристики виброзащитной системы и оптимизация формы этой характеристики, что позволит еще больше снизить воздействия на оператора в виде максимальных скорректированных ускорений.

Список литературы

1. Tianyu L., Zhigui R., Xiaoping P., Dingjun C. Dynamic digging force modeling and comparative analysis of backhoe hydraulic excavators // *Measurement Science and Technology*. 2024. Vol. 35. No. 3. P. 035025. DOI: 10.1088/1361-6501/ad1814
2. Tong Z., Miao J., Li Y. Development of electric construction machinery in China: a review of key technologies and future directions // *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*. 2021. Vol. 22. P. 245–264. DOI: 10.1631/jzus.A2100006
3. Lagunova Y.A., Komissarov A.P., Lukashu O.A. Determination of functions of controlling drives of main executive mechanisms of mining excavators // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 327. No. 5. P. 052024. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052024
4. Peng H., Yanchun Y., Weijia X., et al. Vibration modelling and testing of off-road vehicle incorporating coupled roll and pitch vibrations // *Biosystems Engineering*. 2024. Vol. 240. P. 111–122. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2024.02.006
5. Hu K., Zhang W., Li K. Vibration analysis and optimization of tracked tractor frame based on modal programming method // *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*. 2021. Vol. 42. No. 8. P. 121–126. DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2021.08.17
6. Adam S., Jalil N., Rezali K. The effect of posture and vibration magnitude on the vertical vibration transmissibility of tractor suspension system // *International journal of industrial ergonomics*. 2020. Vol. 80. P. 103014. DOI: 10.1016/j.ergon.2020.103014
7. Xin Y., Dong R. Comfort analysis of crane hoistman based on nonlinear biodynamics coupled with crane-rail system model // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2022. Vol. 36. P. 55–75. DOI: 10.1007/s12206-021-1205-9
8. Loprencipe G., Zoccali P. Ride quality due to road surface irregularities: comparison of different methods applied on a set of real road profiles // *Coatings*. 2017. Vol. 7. No. 5. P. 59. DOI: 10.3390/coatings7050059
9. Korchagin P.A., Teterina I.A., Letopol-

References

1. Tianyu L., Zhigui R., Xiaoping P., Dingjun C. Dynamic digging force modeling and comparative analysis of backhoe hydraulic excavators. *Measurement Science and Technology*, 2024, Vol. 35, No. 3, pp. 035025. DOI: 10.1088/1361-6501/ad1814
2. Tong Z., Miao J., Li Y. Development of electric construction machinery in China: a review of key technologies and future directions. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 2021, Vol. 22, pp. 245–264. DOI: 10.1631/jzus.A2100006
3. Lagunova Y.A., Komissarov A.P., Lukashu O.A. Determination of functions of controlling drives of main executive mechanisms of mining excavators. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, Vol. 327, No. 5, pp. 052024. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052024
4. Peng H., Yanchun Y., Weijia X. Vibration modelling and testing of off-road vehicle incorporating coupled roll and pitch vibrations. *Biosystems Engineering*, 2024, Vol. 240, pp. 111–122. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2024.02.006
5. Hu K., Zhang W., Li K. Vibration analysis and optimization of tracked tractor frame based on modal programming method. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2021, Vol. 42, No. 8, pp. 121–126. DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2021.08.17
6. Adam, S., Jalil, N., Rezali, K. The effect of posture and vibration magnitude on the vertical vibration transmissibility of tractor suspension system. *International journal of industrial ergonomics*, 2020, Vol. 80, pp. 103014. DOI: 10.1016/j.ergon.2020.103014
7. Xin Y., Dong R. Comfort analysis of crane hoistman based on nonlinear biodynamics coupled with crane-rail system model. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2022, Vol. 36, pp. 55–75. DOI: 10.1007/s12206-021-1205-9
8. Loprencipe G., Zoccali pp. Ride quality due to road surface irregularities: comparison of different methods applied on a set of real road profiles. *Coatings*, 2017, Vol. 7, No. 5, pp. 59. DOI: 10.3390/coatings7050059
9. Korchagin P.A., Teterina I.A., Letopol-

sky A.B. Effect of tire dynamic characteristics on vibration load at the operator's workplace // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1441. P. 012097. DOI: 10.1088/1742-6596/1441/1/012097

10. Baranovskiy A.M., Vikulov S.V. Vibration protection system for high-speed vessel crews // *Marine intellectual technologies*. 2019. Vol. 3. No. 1. P. 35–38.

11. Han G., Kim K.D., Ahn D.V. Comparative Analysis of Tractor Ride Vibration According to Suspension System Configuration // *Journal of Biosystems Engineering*. 2023. Vol. 48. P. 69–78. DOI: 10.1007/s42853-022-00165-7

12. Atindana V.A., Xu X., Huan L., et al. Experimental design and optimization of pneumatic low-frequency driver seat for off-road vehicles: quasi-zero negative stiffness and gray wolf optimization algorithm // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2023. Vol. 45. P. 502. DOI: 10.1007/s40430-023-04391-8

13. Chaoran L., Wei Z., Kaiping Y., Tao L., Yan Z. Quasi-zero-stiffness vibration isolation: Designs, improvements and applications // *Engineering Structures*. 2024. Vol. 301. P. 117282. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.117282

14. Коротков М.С., Щербakov В.С., Кашапова И.Е. Амплитудно-частотные характеристики виброзащитной системы сиденья с трехсегментной статической силовой характеристикой и участком квазиулевой жесткости // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2024. № 2. С. 101-110. DOI: 10.22281/2413-9920-2024-10-02-101-110

15. Liu Q., Wang S., Yan G. A human-sensitive frequency band vibration isolator for heavy-duty truck seats // *Applied Mathematics and Mechanics*. 2024. Vol. 45. No. 10. P. 1733–1748. DOI: 10.1007/s10483-024-3177-8

16. Химич А.В., Лагереv И.А. Исследование динамической нагруженности мобильной канатной транспортно-технологической машины, размещенной на склоне // *Научно-технический вестник*

† on vibration load at the operator's workplace. † *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, † Vol. 1441, pp. 012097. DOI: 10.1088/1742- † 6596/1441/1/012097

† 10. Baranovskiy A.M., Vikulov S.V. Vi- † bration protection system for high-speed ves- † sel crews. *Marine intellectual technologies*, † 2019, Vol. 3, No. 1, pp. 35–38.

† 11. Han G., Kim K.D., Ahn D.V. Com- † parative Analysis of Tractor Ride Vibration † According to Suspension System Configura- † tion. *Journal of Biosystems Engineering*, † 2023, Vol. 48, pp. 69–78. DOI: † 10.1007/s42853-022-00165-7

† 12. Atindana V.A., Xu X., Huan L. Ex- † perimental design and optimization of pneu- † matic low-frequency driver seat for off-road † vehicles: quasi-zero negative stiffness and † gray wolf optimization algorithm. *Journal of † the Brazilian Society of Mechanical Sciences † and Engineering*, 2023, Vol. 45, pp. 502. DOI: † 10.1007/s40430-023-04391-8

† 13. Chaoran L., Wei Z., Kaiping Y., Tao † L., Yan Z. Quasi-zero-stiffness vibration isola- † tion: Designs, improvements and applications. † *Engineering Structures*, 2024, Vol. 301, pp. † 117282. DOI:10.1016/ † j.engstruct.2023.117282

† 14. Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Ka- † shapova I.E. Amplitudno-chastotnihe kharak- † teristiki vibrozashitnoy sistemih sidenjya s † trekhsegmentnoy staticheskoy silovoy † kharakteristikoy i uchastkom kvazinulevoy † zhestkosti [Amplitude-frequency characteris- † tics of the vibration-protective seat system † with a three-segment static force characteris- † tic and a quasi-zero stiffness section quasi-zero † stiffness] / M.S. Korytov,. *Nauchno- † tekhnicheskij vestnik Bryanskogo gosu- † darstvennogo universiteta*, 2024, No.2, pp. † 101-110. DOI: 10.22281/2413-9920-2024-10- † 02-101-110 (In Russian)

† 15. Liu Q., Wang S., Yan G. A human- † sensitive frequency band vibration isolator for † heavy-duty truck seats. *Applied Mathematics † and Mechanics*, 2024, Vol. 45, No. 10, pp. † 1733–1748. DOI: 10.1007/s10483-024-3177-8

† 16. Khimich A.V., Lagerev I.A. Issledo- † vanie dinamicheskoy nagruzhennosti mobil- † jnoy kanatnoy transportno-

Брянского государственного университета.
2022. № 2. С. 159-164. DOI: 10.22281/2413-
9920-2022-08-02-159-164

† tekhnologicheskoyj mashin, razmethennoyj
† na sklone [Study of the dynamic loading of a
† mobile rope transport and technological ma-
† chine located on a slope]. *Nauchno-*
† *tekhnicheskijj vestnik Bryanskogo gos-*
† *darstvennogo universiteta*, 2022, No. 2, pp.
† 159-164. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-
† 02-159-164 (In Russian)

✦ ✦

УДК (UDC) 616.9

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ
ВЫНОСНЫХ ОПОР СТРЕЛОВЫХ САМОХОДНЫХ КРАНОВMETHOD FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF IMPROVED OUTRIGGERS
OF SELF-PROPELLED JIB CRANESСладкова Л.А., Борисов И.К.
Sladkova L.A., Borisov I.K.Российский университет транспорта (Москва, Россия)
Russian University of Transport (Moscow, Russian Federation)

Аннотация. Практика эксплуатации стреловых самоходных кранов свидетельствует о их недостаточной устойчивости в процессе выполнения погрузочно-разгрузочных работ в результате проседания опор в грунт. Свидетельством этого являются аварии кранов в результате их опрокидывания, причем среднестатистические показатели, которых практически не изменяется в течение последних двадцати лет. Существующие методы увеличения опорной поверхности (башмаков) выносных опор отличаются низкой культурой производства и сопряжены с высокими затратами по времени и, как следствие, ведущие к снижению производительности. Предлагаемая принципиально новая разработка выносной опоры стрелового самоходного крана, башмак которой позволяет изменять площадь его опорной поверхности в условиях неравномерного распределения усилий под опорами. Целью работы являются описание конструктивных особенностей, выбор и оценка рабочих положений и методика определения параметров основных элементов конструкции предлагаемой выносной опоры. Полученные зависимости позволяют определять соотношение длин звеньев предлагаемой конструкции и изменять их в зависимости от типа несущей способности грунтов или величины хода штока гидроцилиндра, которая равна ширине раскрытия элементов башмака при увеличении площади их опорной поверхности. Установлено, работа конструкции может осуществляться только в двух положениях башмака. Для увеличения (уменьшения) площади опорной поверхности необходимо менять выдвижение штока гидроцилиндра. Предлагаемая конструкция башмака отличается простотой изготовления, и ремонтопригодности и позволяет повысить устойчивость грузоподъемных кранов, строительных машин и т.д. при погрузочно-разгрузочных и строительных работах.

Ключевые слова: стреловые самоходные краны, выносная опора, шарнирный механизм.

Abstract. The practice of operating self-propelled jib cranes indicates their insufficient stability in the process of loading and unloading operations as a result of subsidence of supports in the ground. Evidence of this is the accidents of cranes as a result of their overturning, and the average statistical indicators of which have practically not changed over the past twenty years. The existing methods of increasing the bearing surface (shoes) of outriggers are characterized by a low production culture and are associated with high time costs and, as a result, leading to a decrease in productivity. The proposed fundamentally new development of the outrigger of a self-propelled jib crane, the shoe of which allows you to change the area of its bearing surface in conditions of uneven distribution of forces under the supports. The purpose of the work is to describe the design features, selection, evaluation of operating positions and the method of determining the parameters of the main structural elements of the proposed outrigger. The obtained dependencies make it possible to determine the ratio of the lengths of the links of the proposed design and change them depending on the type of bearing capacity of soils or the stroke of the hydraulic cylinder rod, which is equal to the width of the opening of the shoe elements with an increase in the area of their supporting surface hydraulic cylinder rod. The proposed shoe design is easy to manufacture and maintainable and allows you to increase the stability of lifting cranes, construction machines, etc. during loading and unloading and construction works.

Keywords: self-propelled jib cranes, outrigger, articulated mechanism.

Дата получения статьи: 28.01.2025
Дата принятия к публикации: 01.03.2025
Дата публикации: 25.09.2025

Date of manuscript reception: 28.01.2025
Date of acceptance for publication: 01.03.2025
Date of publication: 25.09.2025



Сведения об авторах:

Сладкова Любовь Александровна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические средства», Российский университет транспорта,
e-mail: rich.cat2012@yandex.ru.

ORCID: 0000-0002-5409-6250

Борисов Илья Константинович – аспирант кафедры «Наземные транспортно-технологические средства», Российский университет транспорта,
e-mail: ilbor97@yandex.ru.

Authors' information:

Liubov A. Sladkova – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Land Transport and Technological Means at Russian University of Transport, *e-mail: rich.cat2012@yandex.ru.*
ORCID: 0000-0002-5409-6250

Ilya K. Borisov – Postgraduate student, Department of Land Transport and Technological Means at Russian University of Transport, *e-mail: ilbor97@yandex.ru.*

1. Введение

Выносные опоры (аутригеры) – это специальное устройство, устанавливаемое, как правило, на стреловых самоходных кранах и предназначенное для повышения их продольной и поперечной устойчивости при выполнении погрузочно-разгрузочных работ за счет увеличения площади опорной поверхности крана. Однако сама по себе опорная площадь башмака не всегда обеспечивает необходимую устойчивость из-за различия опорных реакций под

башмаками выносных опор даже в режиме статики [1 - 5]. Это положение в большей степени усугубляется в процессе выполнения погрузочно-разгрузочных операций крановым оборудованием, что ведет к опрокидыванию крана.

Уравновешивание реакций под каждой опорой возможно при условии регулирования размера площади башмака под опорой за счет изменения его конструкции и конструкции аутригера (рис. 1).



а)



б)

Рис. 1. Аутригеры:

а – с круглым башмаком; б – с прямоугольным башмаком

На рис. 1 видно, что в процессе работы кран вывешивается на выносных опорах. Это свойство будет учтено при усовершенствовании конструкции аутригера и его башмака.

Предлагаемые авторами [6 - 8] конструктивные решения, выполненные в этом направлении, имеют определенные

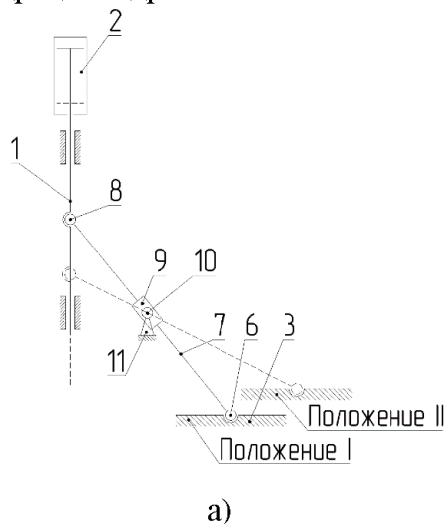
недостатки, связанные со сложностью конструкции, высокой конструктивной преемственностью из-за большого числа образующих звеньев (элементов) и недостаточной площадью опорной поверхности в результате чего под них дополнительно укладываются, как правило, деревянные щиты (рис. 1, а), либо

устанавливаются на жестком основании (рис. 1, б).

2. Конструкция выносной опоры и методика определения ее параметров

Предлагаемое техническое решение по усовершенствованию выносных опор стреловых самоходных кранов позволяет повысить устойчивость при погрузочно-разгрузочных и строительных работах.

Конструкция аутригера (рис. 2, а) состоит из гидроцилиндра 2 со штоком



(направляющей) 1 – основной опоры, на котором шарнирно закреплен стержень 7, который на свободном конце содержит шарнирно соединенный с ним башмак 3. На стержне 7 между шарнирами 8 и 6 расположен ползун 9, шарнирно закрепленный шарниром 10 на неподвижной опоре 11. Опора башмака 3 выполнена из равных частей 4, на каждой оси симметрии 5 которых расположен шарнир 6, соединенный со стержнем 7 (рис. 2, б).

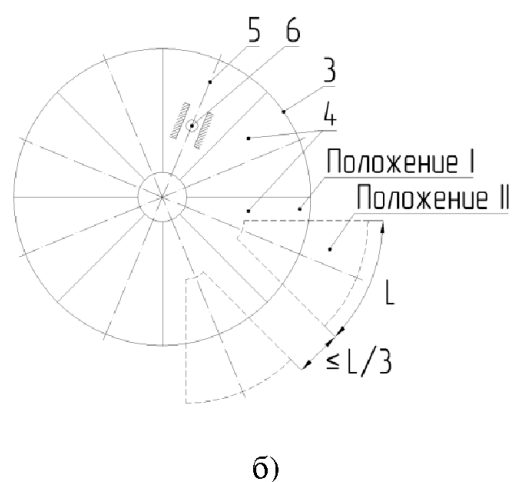


Рис. 2. Конструкция аутригера:
а – шарнирно-сочлененная схема; б – вид сверху на башмак

Принцип работы устройства следующий. При выдвигании штока 1 гидроцилиндра 2, происходит перемещение стержня 7 вместе с башмаком 3 из положения I в положение II, которое указано пунктиром (рис. 2). При этом составные части 4 опоры 3 раздвигаются на расстояние, исходя из условия отсутствия проникновения грунта между двумя близлежащими поверхностями [9].

В процессе работы выносной опоры считаем, что башмак свое последующее положение при условии неизменности длины стержня 7 будет занимать, не отклоняясь от горизонтали (рис. 3) и обеспечивая устойчивое положение крана.

Для этого рассмотрим работу предлагаемого механизма в двух расчетных положениях, которые будем считать общими (рис. 3), причем изменение происходит в

прямоугольной системе координат. В точке О расположена опора 11 с шарниром 10. Введем условные обозначения: A_{max} – расстояние, соответствующее начальному положению штока 1, при сложенной конструкции башмака 3, м; A_{min} – конечное положение штока 1, соответствующее полному раскрытию конструкции башмака 3, м; s – ход штока 1 при полном раскрытии башмака, м; α – величина раскрытия конструкции башмака 3, соответствующее расстоянию между соседними элементами 4 конструкции башмака 4 при полном его раскрытии из условия непротекания грунта между элементами, м; α – угол между начальным и конечным положением элемента 7, град; β – угол между элементом 7 в начальном положении и вертикалью, град; L – длина стержня 7, м; $O(x; y)$ – координаты неподвижной опоры 11,

координата ползуна 9, координата шарнира 10; l_1 – длина части элемента 7 в начальном положении, расстояние между шарниром 8 и шарниром 10, м; l_2 – длина части элемента 7 в начальном положении, расстояние между шарниром 10 и шарниром 6, м; l_3 – длина

части элемента 7 в конечном положении, расстояние между шарниром 8 и шарниром 10, м; l_4 – длина части элемента 7 в конечном положении, расстояние между шарниром 10 и шарниром 6, м; d – начальный диаметр башмака, м.

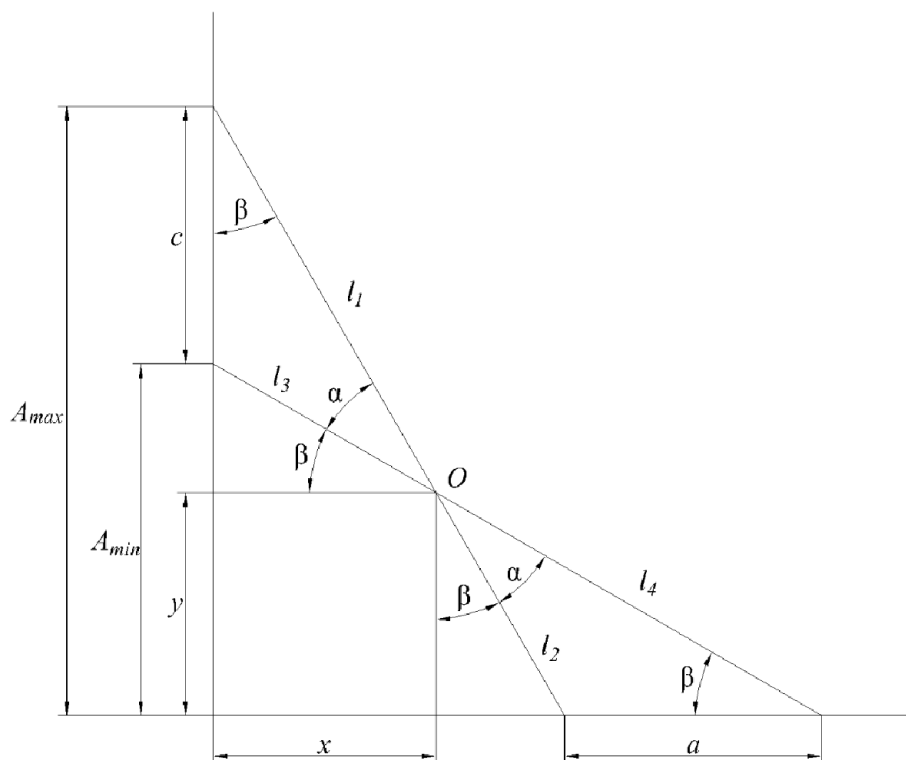


Рис. 3. Положения выносной опоры

Из тригонометрических соотношений (рис. 3):

$$\begin{aligned} A_{max} &= x \operatorname{tg}(\alpha + \beta) + y = \\ &= l_1 \sin(\alpha + \beta) + y; \end{aligned} \quad (1)$$

$$A_{min} = x \operatorname{tg} \beta + y = l_3 \sin \beta + y.$$

Из условия проектирования шарнирно-сочлененного механизма:

$$l_1 + l_2 = L; \quad (2)$$

$$l_3 + l_4 = L. \quad (3)$$

Учитывая рис. 3:

$$l_4 = \frac{y}{\cos(\alpha + \beta)}. \quad (4)$$

Используя зависимости (3) и (4), выразим l_3

$$l_3 = L - \frac{y}{\cos(\alpha + \beta)}. \quad (5)$$

Используя равенства (2) и (3), получим:

$$x \operatorname{tg} \beta + y = l_3 \sin \beta + y. \quad (6)$$

Подставив выражение (6) в (5), определим:

$$x \operatorname{tg} \beta + y = \quad (7)$$

$$= \left(L - \frac{y}{\cos(\alpha + \beta)} \right) \sin \beta + y.$$

Откуда

$$x \cdot \operatorname{tg} \beta = \left(L - \frac{y}{\cos(\alpha + \beta)} \right) \sin \beta.$$

Разделив левую часть выражения на правую, получим

$$\frac{x \cdot \operatorname{tg} \beta}{\left(L - \frac{y}{\cos(\alpha + \beta)}\right) \sin \beta} = 1. \quad (8)$$

Откуда определим величину x :

$$x = \frac{L \cos \beta - y \cos \beta}{(\cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta)}. \quad (9)$$

В этом выражении, исходя из конструкции механизма, величина $\cos \beta \neq 0$. После преобразования выражения (9) получим:

$$\frac{x}{\cos \beta} = L - \frac{y}{\cos(\alpha + \beta)}. \quad (10)$$

Зная, что (рис. 3)

$$\cos(\alpha + \beta) = \frac{x}{l_1}. \quad (11)$$

Подставив выражение (11) в (8), получаем:

$$\frac{x \cdot \operatorname{tg} \beta}{\left(L - \frac{yl_1}{x}\right) \sin \beta} = 1. \quad (12)$$

Откуда после почленного умножения выражения (12) на x , получим:

$$x^2 = \cos \beta (Lx - yl_1). \quad (13)$$

Выразив y через x , получим уравнение второго порядка:

$$y = \frac{Lx}{l_1} - \frac{x^2}{l_1 \cos \beta}. \quad (14)$$

Для простоты преобразований введем параметр $\lambda = L / l_1$. Тогда с учетом зависимости (12) получим:

$$y = \lambda x - \frac{x^2}{l_1 \cos \beta}. \quad (15)$$

Далее, используя рис. 3, определим величину раскрытия a конструкции башмака 3:

$$a = L(\cos \beta - \sin \beta). \quad (16)$$

Зависимости (1) и (3) подставим в уравнение (14). Величина раскрытия элементов 4 башмака 3 определяется многопараметрическим уравнением, зависящим от координирования неподвижной опоры с центром в точке О. Откуда

$$y = x = l_1 \sin \beta = L \frac{\sin \beta \cos \beta}{\sin \beta + \cos \beta}. \quad (17)$$

$$l_1 = L \frac{\cos \beta}{\sin \beta + \cos \beta} \quad (18)$$

Используя зависимость (18), получим:

$$\frac{L}{l_1} = \lambda = 1 + \operatorname{tg} \beta. \quad (19)$$

Графическая интерпретация выражений (19) имеет вид (рис. 4):

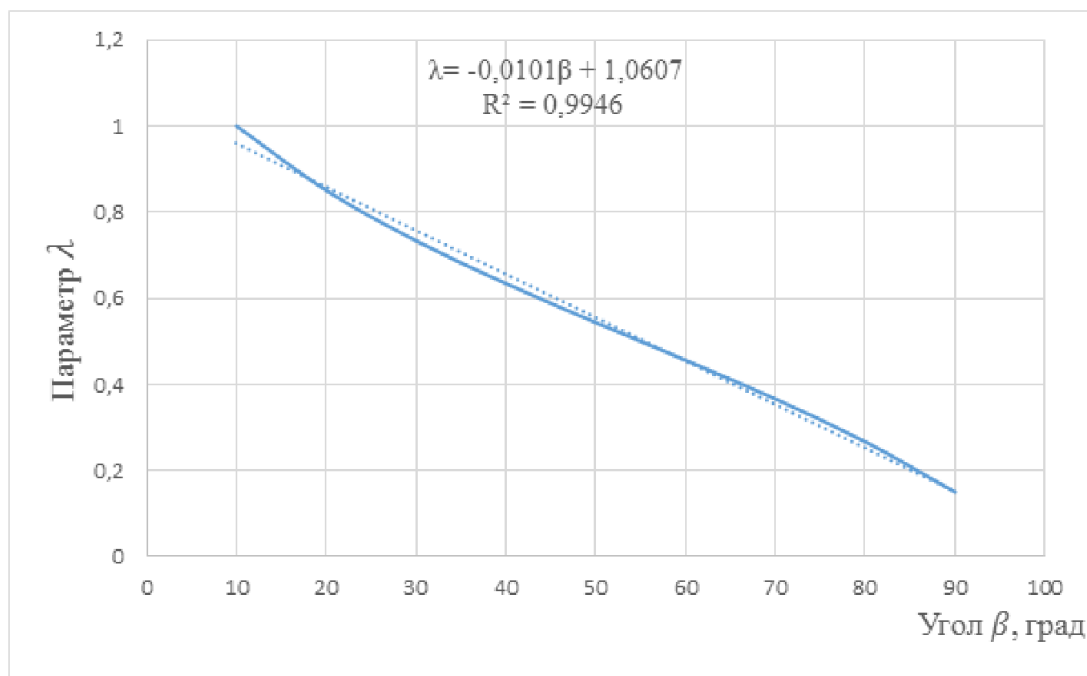


Рис. 4. Изменение отношения параметра λ от угла β

Компьютерная обработка позволила установить, что выражение (19) с доверительной вероятностью 0,95 при коэффициенте рассеяния $R^2 = 1$ можно заменить соотношением:

$$\lambda = -0,0101\beta + 1,0607. \quad (20)$$

Полученное уравнение позволяет определять:

- положение опоры 11 в зависимости от соотношения длин звеньев;
- угол раскрытия опоры α в зависимости от хода штока.

3. Анализ параметров конструкции

Очевидно, что при положении опоры 11 на одинаковом расстоянии от вертикали и горизонтали, т.е. при условии, что положение неподвижной опоры в точке O возможно, если $x = y$, а перемещение штока гидроцилиндра s равно ширине раскрытия a элементов башмака (рис. 1 и 2).

На рис. 5 видно, что для прямолинейного перемещения существует всего два положения при выносе башмака аутригера предлагаемой конструкции в зависимости от изменения угла β , величина которого зависит

от указанных параметров, так как они имеют прямо пропорциональную зависимость (20). Работа конструкции может осуществляться только в двух положениях башмака и для увеличения (уменьшения) площади опорной поверхности необходимо менять выдвижение штока гидроцилиндра [10, 11].

Сказанное выше подтверждается графо-аналитическим построением, положений точек перемещения башмака выносных опор (рис. 5, а).

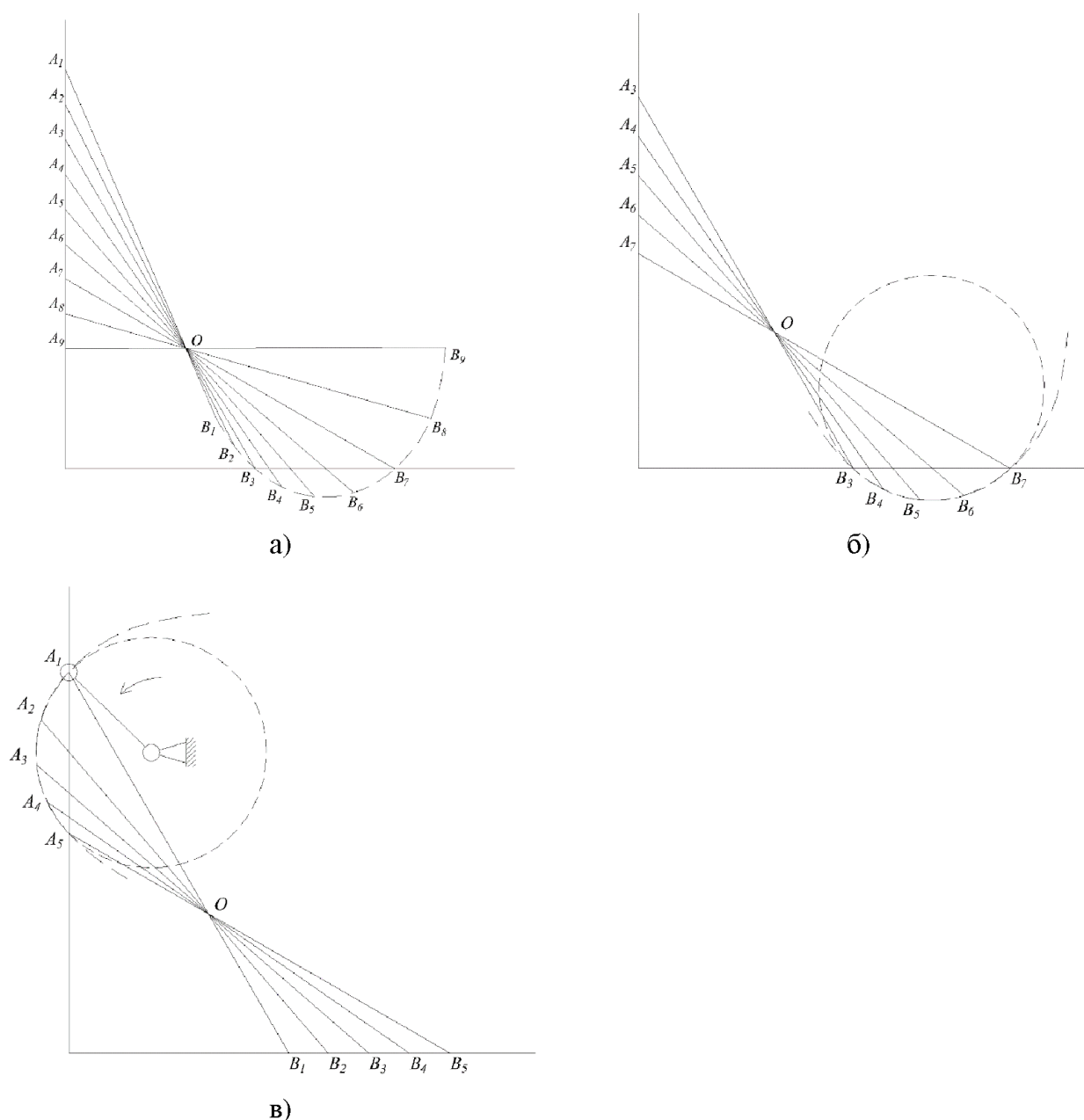


Рис. 5. Траектория перемещения точек выносных опор: а – расчетная схема; б – при прямолинейном перемещении по вертикальной оси; в – при прямолинейном перемещении по горизонтальной оси

На рис. 5, в видно, что при прямолинейном перемещении башмака по горизонтали, верхняя его часть выходит за пределы вертикальной линии, что потребует перемещения направляющей гидроцилиндра. Если оставить без изменения положения направляющей, башмак будет располагаться

ниже уровня опорной поверхности, либо «зависать» в воздухе (рис. 5, б).

Для устранения указанного недостатка можно использовать шатунно-поршневой механизм [12], что потребует введения кривошипа с отбором мощности от отдельного двигателя.

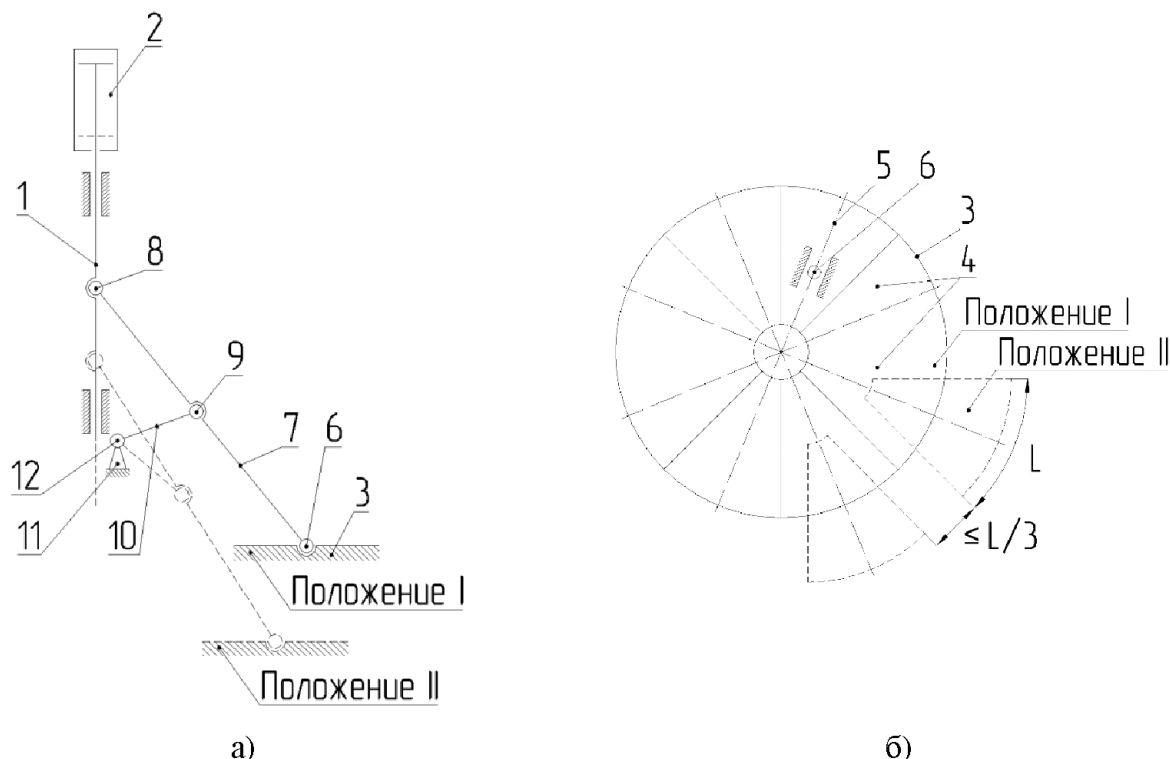


Рис. 6. Конструкция аутригера:
а – шарнирно-сочлененная схема; б – вид сверху на башмак

Либо предлагается конструкция, показанная на рис. 6. Устройство (рис. 6), содержащее направляющую 1, устройство перемещения 2 опоры 3 на направляющей 1, при этом опора 3 выполнена из равных частей 4, на каждой оси симметрии 5 которых расположен шарнир 6, соединенный со стержнем 7, свободный конец которого шарнирно соединен с направляющей 1 шарниром 8. На стержне 7 между шарнирами 8 и 6 расположен шарнир 9, шарнирно соединенный со стержнем 10, свободный конец которого соединен с неподвижной опорой 11 шарниром 12. При этом расстояние между составными частями 4 опоры 3 не превышает $L/3$ длины наиболее удаленной от центра части 4 опоры 3, условие которого основано на условии

непротекания грунта между двумя близлежащими поверхностями.

4. Заключение

Рассматриваемое техническое решение позволяет повысить устойчивость грузоподъемных кранов, строительных машин и т.д. при погрузочно-разгрузочных и строительных работах за счет изменения площади опорной поверхности под башмаком аутригера. Методика определения параметров усовершенствованных выносных опор стреловых самоходных кранов, основанная на основных положениях теоретической механики, теории механизмов и машин позволила определить основные геометрические соотношения между элементами конструкции, выбрать

рациональное положение для обеспечения требуемой устойчивости исходя из размеров выдвижения штока механизма перемещения башмака аутригера и условия непротекания грунта между раздвигаемыми лепестками предлагаемой конструкции. Для обеспечения

Список литературы

1. Григорьев П.А., Сладкова Л.А., Крылов В.В. Теоретическое и экспериментальное обоснование изменения усилий в опорах стрелового самоходного крана // Вестник Брянского государственного технического университета. 2020. №2. С.43-52.
2. Сладкова Л.А., Григорьев П.А., Крылов В.В. Моделирование усилий в опорах машин основного технологического назначения на примере стрелового самоходного крана // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №4. С.516-522.
3. Гуляев Ф.А., Батищев Г.А., Емельянова Г.А., Куликова Е.В. К вопросам обеспечения устойчивости стреловых самоходных кранов при учете различных аспектов их эксплуатации // В сборнике: XXXI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС - 2019). 2020. С. 581-584.
4. Сладкова Л.А., Григорьев П.А., Крылов В.В., Трошко И.В. Грузоподъемные машины и оборудование. М.: РУТ (МИИТ). 2020. 40 с.
5. Горелова М.В. Мехатронная система управления для автоматической стабилизации стрелового самоходного крана при ненормируемых внешних воздействиях: дисс.... канд.техн.наук 2.5.2. Машиноведение, М.: РУТ, 2023. 186 с.
6. Марысев Б.К. Патент SU 545 564 A1, МПК В66С23/78. Выносная опора грузоподъемного крана: Опубликовано 05.02.1977, Бюл. № 5.
7. Акимов В.Н., Апальков Д.В., Голубев Б.М., Марданов Р.Д., Мокшин В.С., Оконьский А.Б., Сагдеев К.Б., Тилипан И.Г., Шачнев В.Т. Патент RU 2116210 C1.

прямолинейного перемещения башмака предложен вариант использования шатунно-поршневого механизма за счет включения в предлагаемую схему механизма дополнительного кривошипа.

References

1. Grigoriev P.A., Sladkova L.A., Krylov V.V. Theoreticheskoe i experimentalnoe obosnovanie izmenenia usilii v oporakh strelovogo samokhodnogo kрана. Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2020, No. 2, pp. 43-52. (In Russian)
2. Sladkova L.A., Grigoriev P.A., Krylov V.V. Modelirovanie usilii v oporakh mashinakh osnovnogo tekhnologicheskogo naznacheniya na primere strelovogo samokhodnogo kрана. Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta. 2019. 4. Pp. 516-522. (In Russian)
3. Gulyaev F.A., Batishchev G.A., Emelyanova G.A., Kulikova E.V. K voprosam obespecheniya ustoychivosti streloveykh samokhodneykh kранov pri uchiye razlichnykh aspektov ikh ekspluatatsii. In: Sbornik XXXI Mezghdunarodnoy innovatsionnoy konferentsii molodykh uchenykh i studentov po problemam mashinovedeniya (MIKMUS - 2019), 2020, pp. 581-584. (In Russian)
4. Sladkova L.A., Grigoriev P.A., Krylov V.V., Troshko I.V. Gruzopodiemnyye mashinye i oborudovanie [Lifting machines and equipment]. Moscow, RUT (MIIT), 2020. 40 p. (In Russian)
5. Gorelova M.V. Mechatronnaya Sistema upravleniya dlya avtomaticheskoy stabilitsii strelovogo samokhodnogo kрана pri nenormiruemykh vneshnikh vozdeystviakh: Diss.... Ph.D. 2.5.2 Mashinovedenie. Moscow, RUT, 2023. 186 p. (In Russian)
6. Marysev B.K. Patent SU 545 564 A1, IPC B66C23/78. Vynosnyaya opora gruzopodiemnogo kрана: Opublikovano 05.02.1977, Byul. No. 5. (In Russian)
7. Akimov V.N., Apalkov D.V., Golubev B.M., Mardanov R.D., Mokshin V.S., Okonsky A.B., Sagdeev K.B., Tilipan I.G., Shachnev V.T. Patent RU 2116210 C1. Autrigger.

Аутригер. Опубликовано 05.02.1977, Бюл. № 5.

8. Щербаков В.С., Бычков И.С. Патент 187891 Российская Федерация. Выносная опора грузоподъемной машины. Опубликовано 21.03.2019, Бюл. №9. 5 с.

9. Зеленин А.Н., Баловнев В.И., Керов И.П. Машины для земляных работ. М.: Машиностроение, 1975. 324 с.

10. Kacalak W., Budniak Z., Majewski M. Stability Assessment as a Criterion of Stabilization of the Movement Trajectory of Mobile Crane Working Elements // International Journal of Applied Mechanics and Engineering. 2018. №23. P.65-77.

11. Qian J.B., Bao L.P., Yuan R.B., Yang X.J. Modeling and Analysis of Outrigger Reaction Forces of Hydraulic Mobile Crane // International Journal of Engineering. 2017. №30. P.1246-1252.

12. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. М.: Машиностроение, 2021. 560 с.

† Opublikovano 05.02.1977, Byul. No. 5. (In Russian)

† 8. Shcherbakov V.S., Bychkov I.S. Patent 187891 Russian Federation. Vynosnya opora gruzopodiemnoiy mashinye. Opublikovano 21.03.2019, Byul. No. 9. 5 p. (In Russian)

† 9. Zelenin A.N., Balovnev V.I., Kerov I.P. *Mashiny dlia zemlyanykh rabot* [Machines for earthworks]. Moscow, Mashinostroenie, 1975. 324 p. (In Russian)

† 10. Kacalak W., Budniak Z., Majewski M. Stability Assessment as a Criterion of Stabilization of the Movement Trajectory of Mobile Crane Working Elements. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, 2018, No. 23, pp. 65-77.

† 11. Qian J.B., Bao L.P., Yuan R.B., Yang X.J. Modeling and Analysis of Outrigger Reaction Forces of Hydraulic Mobile Crane. *International Journal of Engineering*, 2017, No. 30, pp. 1246-1252.

† 12. Artobolevskiy I.I. *Theoria mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines]. Moscow, Mashinostroenie, 2021. 560 p. (In Russian)

УДК (UDC) 629.113

ИЗМЕНЕНИЕ ВО ВРЕМЕНИ НАДЕЖНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ
МНОГООСНЫХ КОЛЕСНЫХ ШАССИTIME CHANGE PROCESS IN MECHANICAL TRANSMISSION RELIABILITY OF
MULTI-AXLE WHEELED VEHICLESТаричко В.И.¹, Лагереv А.В.², Мазлумян Г.С.¹
Tarichko V.I.¹, Lagerev A.V.², Mazlumyan G.S.¹¹ – Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (Москва, Россия)² – Российский университет транспорта (Москва, Россия)¹ – Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (Moscow, Russian Federation)² – Russian University of Transport (Moscow, Russian Federation)

Аннотация. Многоосные колесные шасси находят широкое применение для решения различных транспортно-логистических задач на территориях со сложным рельефом, неблагоприятными почвенными условиями, наличием природных препятствий и отсутствием минимально необходимой транспортной инфраструктуры. Объектом исследования является механическая трансмиссия многоосного колесного шасси с несколькими ведущими и ведомыми мостами. Цель исследования заключается в создании инженерной методики прогнозирования кинетики (изменения во времени или в зависимости от пробега) количественных показателей надежности трансмиссии в целом и ее ключевых подсистем в течение всего нормативного срока эксплуатации шасси. Методика базируется на разработанной вероятностной математической модели. Она позволяет прогнозировать кинетику показателей надежности как механической трансмиссии в целом, так и ее подсистем с учетом сроков и объемов проведения ремонтно-восстановительных работ. Расчет вероятностей нахождения трансмиссии и ее подсистем в произвольный момент времени в исправном состоянии основан на решении системы линейных дифференциальных уравнений Чепмена-Колмогорова. Предусмотрено периодическое реформирование системы уравнений в моменты времени проведения плановых ремонтов шасси. Представлены результаты тестового расчета применительно к механической трансмиссии 6-осного колесного шасси с колесной формулой 12х10.

Ключевые слова: многоосное шасси, трансмиссия, кинетика надежности, исправное состояние, отказ

Abstract. Multi-axle wheeled chassis are widely used to solve various transport and logistics tasks in areas with difficult terrain, unfavorable soil conditions, the presence of natural obstacles and the lack of minimum necessary transport infrastructure. The object of the study is a mechanical transmission of a multiaxial wheeled chassis with several drive and non-driving axles. The purpose of the study is to create an engineering methodology for predicting the kinetics (changes over time or depending on mileage) of quantitative indicators of the reliability of the transmission as a whole and its key subsystems during the entire service life of the chassis. The methodology is based on the developed probabilistic mathematical model. It allows you to predict the kinetics of reliability indicators of both the mechanical transmission as a whole and its subsystems, taking into account the timing and volume of repair and restoration work. The calculation of the probabilities of finding the transmission and its subsystems in good condition at any given time is based on solving the Chapman-Kolmogorov system of linear differential equations. Periodic reformulation of this system of equations is provided at the time of scheduled repairs of the wheeled chassis. The results of a test calculation example and their analysis are presented in relation to the mechanical transmission of a 6-axle wheeled chassis with a 12x10 wheel formula.

Keywords: multi-axle chassis, transmission, reliability kinetics, serviceability, failure.

Дата получения статьи: 01.03.2025
Дата принятия к публикации: 15.04.2025
Дата публикации: 25.09.2025

Date of manuscript reception: 01.03.2025
Date of acceptance for publication: 15.04.2025
Date of publication: 25.09.2025

Сведения об авторах:

Таричко Вадим Игоревич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортные установки», ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», e-mail: 32.6909@mail.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0286-725X>

Authors' information:

Vadim I. Tarichko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Transport installations at Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), e-mail: 32.6909@mail.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0286-725X>



Лагереv Александр Валерьевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические средства», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», e-mail: bsu-avl@yandex.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0380-5456>

Мазлумян Григорий Сергеевич – доктор технических наук, проректор по научной работе, заведующий каф. «Транспортные установки», ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», e-mail: nauka@madi.ru.

Alexander V. Lagerev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department «Ground transportation and technological facilities» at Russian University of Transport, e-mail: bsu-avl@yandex.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0380-5456>

Grigoriy S. Mazlumyan – Doctor of Technical Sciences, Vice-Rector for Research, Head of Department of the Transport installations at Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), e-mail: nauka@madi.ru.

1. Введение

В настоящее время многоосные колесные шасси, у которых большинство или даже все оси являются ведущими осями, находят широкое применение для решения различных транспортно-логистических задач на территориях со сложным рельефом, неблагоприятными почвенными условиями, наличием природных препятствий и отсутствием минимально необходимой транспортной инфраструктуры [1-3].

Одним из основных направлений обеспечения требуемого уровня надежности трансмиссии колесных шасси на стадии их проектирования и производства является совершенствование конструкции, методов расчета и анализа технического состояния, технологических методов повышения индивидуальной надежности ключевых структурных элементов трансмиссии [4, 5]. Для этого широко используются различные виды математического и имитационного моделирования [6, 7], подходы на основе искусственного интеллекта [8], оптимизационные модели [1], цепи Маркова [9], деревья отказов [10], цифровые двойники [11, 12] и др.

Объектом исследования, результаты которого представлены в данной статье, является механическая трансмиссия многоосного колесного шасси с несколькими ведущими и ведомыми мостами. Шасси предназначено для размещения навесного оборудования различного функционального назначения.

Цель исследования является создание инженерной методики прогнозирования кинетики (изменения во времени или в зависимости от пробега) количественных показателей надежности трансмиссии в целом и ее

ключевых подсистем в течение всего нормативного срока эксплуатации шасси.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- разработана методика прогнозирования кинетики (изменения во времени и в зависимости от пробега) количественных показателей надежности трансмиссии в целом и ее ключевых подсистем в течение срока эксплуатации многоосного колесного шасси;
- проведен тестовый расчет кинетики количественных показателей надежности трансмиссии в целом и ее ключевых подсистем применительно к 6-осному колесному шасси с колесной формулой 12х10.

2. Трансмиссия многоосного колесного шасси

Как пример, на рис. 1 показана принципиальная кинематическая схема 6-осного колесного шасси с колесной формулой 12х10. Она может рассматриваться как типовая кинематическая схема механической трансмиссии многоосного колесного шасси с несколькими ведущими мостами.

Механическое оборудование трансмиссии многоосного колесного шасси структурно может быть представлено в виде совокупности $N = N_m + N_s + 1$ структурно-функциональных подсистем:

- подсистемы общих элементов трансмиссии;
- отдельных подсистем ведущих мостов числом N_m);
- отдельных подсистем ведомых мостов числом N_s).

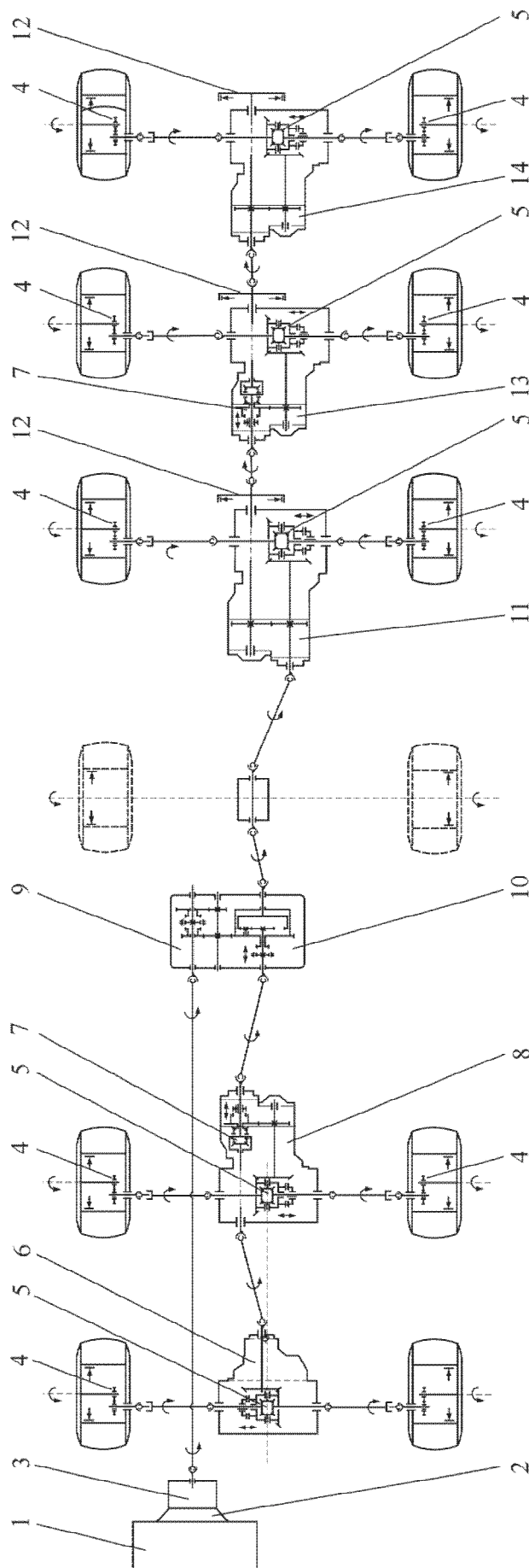


Рис. 1. Кинематическая схема колесного шасси 12х10:

- 1 - двигатель внутреннего сгорания; 2 - сцепление; 3 - механическая коробка переключения передач; 4 - несосный колесный редуктор;
5 - симметричный межколесный дифференциал; 6 - редуктор первого моста; 7 - симметричный межосевой дифференциал;
8 - редуктор второго моста; 9 - раздаточная коробка; 10 - несимметричный центральный дифференциал; 11 - редуктор четвертого моста;
12 - стояночный тормоз; 13 - редуктор пятого моста; 14 - редуктор шестого моста

На рис. 2 показана общая структурно-функциональная схема трансмиссии многоосного колесного шасси применительно к 6-осному шасси с колесной формулой 12х10 (рис. 1). Схема включает отдельные структурно-функциональные схемы указанных подсистем общим числом $N = 7$. В табл. 1 для этих подсистем приведен перечень структурных элементов, потенциально опасных с точки зрения их возможных отказов и, таким образом, способных оказывать влия-

ние на изменение количественных показателей надежности как отдельных подсистем, так и трансмиссии в целом. В табл. 1 также дана нумерация этих элементов, которая далее используется в расчетных зависимостях математической модели. Общее число подлежащих учету элементов в каждой из подсистем составляет $n_c = 8$, $n_m = 9$ и $n_s = 4$ соответственно, т.е. суммарно $N_e = 21$ структурный элемент.

Таблица 1

Перечень обозначений и нумерация элементов структурных подсистем трансмиссии многоосного колесного шасси

Обозначение	Номер	Описание структурного элемента	Число
<i>Подсистема общих элементов трансмиссии</i>			
С	c_1	Сцепление	1
Кп	c_2	Коробка передач	1
Кр	c_3	Коробка раздаточная	1
Дц	c_4	Дифференциал центральный	1
До	c_5	Дифференциал межосевой	$n_{до}$
Тс	c_6	Тормоз стояночный	$n_{тс}$
Ш	c_7	Шарнир карданный	$n_{ш}$
В	c_8	Вал карданный	$n_{в}$
<i>Подсистема i-го ведущего моста</i>			
Дк _i	$m_{i,1}$	Дифференциал межколесный	1
Рм _i	$m_{i,2}$	Редуктор моста	1
Рк _i	$m_{i,3}$	Редуктор колесный	2
О _i	$m_{i,4}$	Полуось	2
Ш _i	$m_{i,5}$	Шарнир карданный	2
К _i	$m_{i,6}$	Колесо	2
Шс _i	$m_{i,7}$	Шарнир равных угловых скоростей карданный	2
Ф _i	$m_{i,8}$	Соединение фланцевое	2
Тк _i	$m_{i,9}$	Тормоз колесный	2
<i>Подсистема j-го ведомого моста</i>			
Кг _j	$s_{j,1}$	Картер главной передачи	1
Ов _j	$s_{j,2}$	Полуось	2
К _j	$s_{j,3}$	Колесо	2
Тк _j	$s_{j,4}$	Тормоз колесный	2

В процессе своего функционирования трансмиссия колесного шасси может находиться в одном из трех возможных сочетаний состояний:

- 1) исправном и работоспособном состояниях;
- 2) неисправном и работоспособном состояниях;

3) неисправном и неработоспособном состояниях.

Первый случай полностью соответствует штатной работе трансмиссии. Во втором случае ее работа вполне возможна, хотя и требуется предусмотреть проведение необходимых восстановительных операций для тех элементов, у которых произошел некритиче-

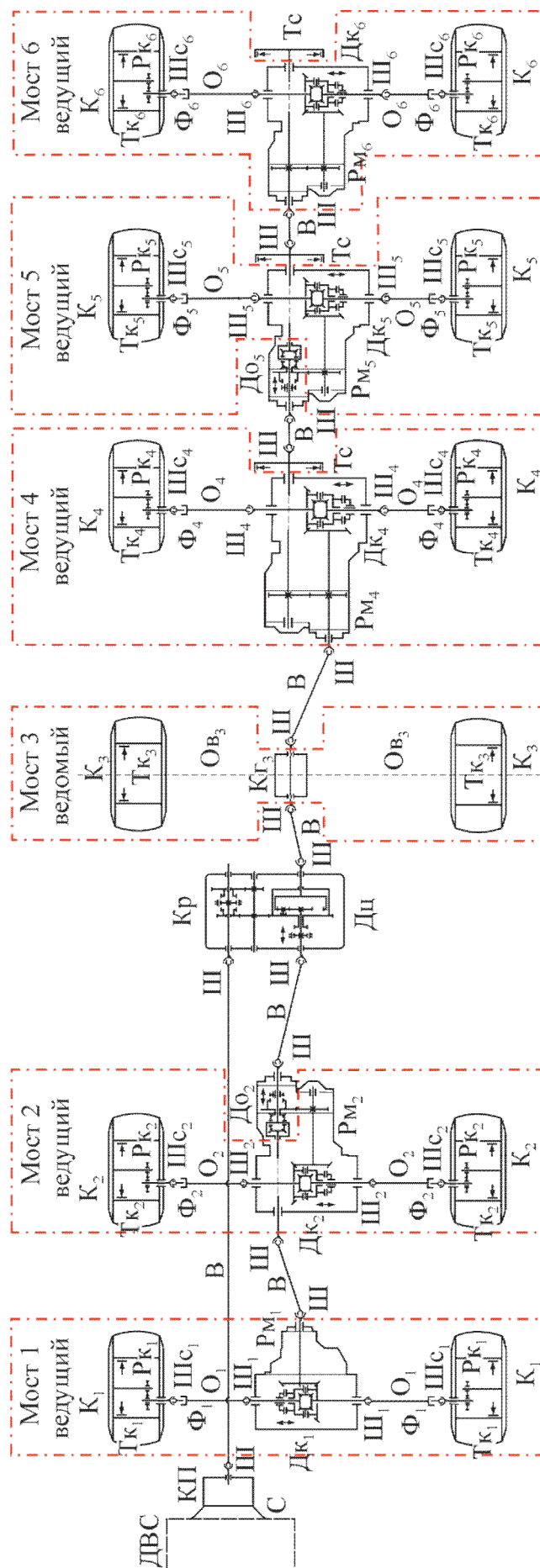


Рис. 2. Структурно-функциональная схема надежности колесного шасси 12x10 для анализа надежности трансмиссии

ский отказ к моменту времени ближайшего планового перерыва в эксплуатации. В третьем случае работа трансмиссии оказывается невозможной и требует немедленной остановки и проведения восстановительных операций, как минимум, для того элемента, у которого произошел критический отказ. Очевидно, количественные показатели надежности, характеризующие переход трансмиссии в третье сочетание возможных состояний, должны быть использованы для оценки технического риска.

3. Математическая модель

При анализе вероятности нахождения рассматриваемой трансмиссии в неисправном состоянии во время эксплуатации многоосного колесного шасси следует учитывать, что в произвольный момент времени она может находиться в одном из следующих возможных состояний:

- одном исправном состоянии S_0 (все структурные элементы в исправном состоянии);
- одном из нескольких неисправных состояний $S_1, S_2, \dots, S_m, \dots, S_{N_e}$ (в каждом состоянии одним m -й элемент находится в неисправном состоянии при исправном состоянии остальных элементов).

В качестве допущения примем, что вероятность наступления последующего отказа произвольного q -го элемента до момента восстановления произошедшего отказа m -го элемента является пренебрежимо малой величиной.

Исходя из данного допущения, на рис. 3 построен граф возможных состояний и связывающих их переходов при эксплуатации трансмиссии в целом. Он представляет собой композицию аналогичных по структуре графов отдельных подсистем. Графы отдельных подсистем приведены на рис. 4. Количественной характеристикой перехода v -й подсистемы из исправного состояния $S_{v,0}$ в неисправное состояние $S_{v,m}$, вызванного отказом m -го элемента, является интенсивность отказов $\lambda_{v,m}$ этого элемента. Количественной характеристикой обратного перехода из неисправного состояния $S_{v,m}$ в исправное состояние $S_{v,0}$, вызванного ремонтом или заменой ранее отказавшего m -го элемента, является интенсивность восстановления $\mu_{v,m}$ этого элемента.

Вероятности $P_0, P_1, \dots, P_m, \dots, P_M$ (для $M = N_e + 1$) нахождения рассматриваемой трансмиссии в произвольный момент времени эксплуатации во всех возможных состояниях $S_0, S_1, \dots, S_m, \dots, S_M$ могут быть определены с помощью уравнения Чепмена-Колмогорова [13, 14]. Для графов на рис. 3 и 4 оно выражается системой обыкновенных дифференциальных уравнений I порядка.

При анализе перехода технического объекта из исправного состояния в неисправное состояние (граф на рис. 3а) система уравнений будет иметь следующий вид:

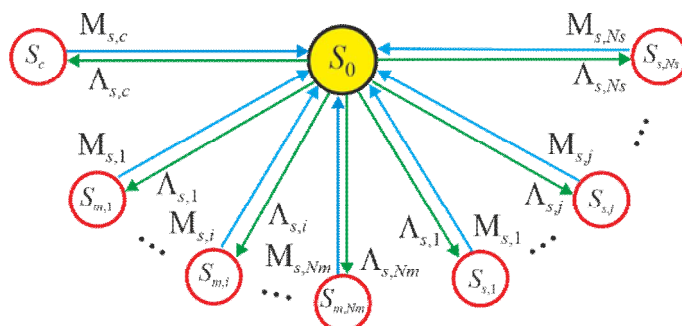


Рис. 3. Граф возможных состояний и переходов между ними при эксплуатации трансмиссии

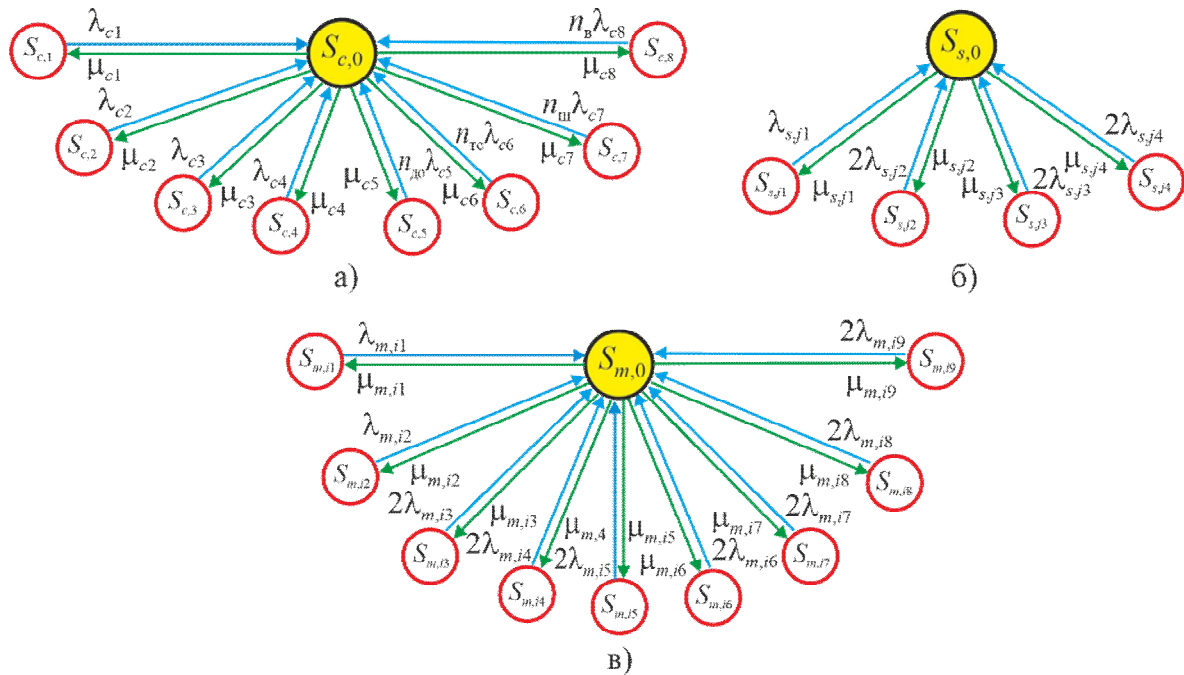


Рис. 4. Графы возможных состояний и переходов между ними при эксплуатации отдельных подсистем трансмиссии: а – подсистема общих элементов трансмиссии; б – подсистема ведомого моста; в – подсистема ведущего моста

$$\begin{Bmatrix} \dot{P}_0 \\ \dot{\mathbf{P}}_c \\ \dot{\mathbf{P}}_M \\ \dot{\mathbf{P}}_S \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Lambda & \{\omega_{c\mu}\} & \{\omega_{M\mu}\} & \{\omega_{S\mu}\} \\ \{\omega_{c\lambda}\} & [\Omega_{cc}] & [0]_{cM} & [0]_{cS} \\ \{\omega_{M\lambda}\} & [0]_{cM}^T & [\Omega_{MM}] & [0]_{MS} \\ \{\omega_{S\lambda}\} & [0]_{cS}^T & [0]_{MS}^T & [\Omega_{SS}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_0 \\ \mathbf{P}_c \\ \mathbf{P}_M \\ \mathbf{P}_S \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

где P_0 - вероятность нахождения трансмиссии в исправном состоянии; $\{\dots\}^T$, $[\dots]^T$ - операция транспонирования вектора, матри-

цы; Λ - суммарная интенсивность отказов структурных элементов трансмиссии, определяемая следующими зависимостями:

$$\begin{aligned} \Lambda &= \Lambda_c + \sum_{i=1}^{i=N_m} \Lambda_{mi} + \sum_{j=1}^{j=N_s} \Lambda_{sj}; \\ \Lambda_c &= \lambda_{c1} + \lambda_{c2} + \lambda_{c3} + \lambda_{c4} + n_{до} \lambda_{c5} + n_{TC} \lambda_{c6} + n_{Ш} \lambda_{c7} + n_B \lambda_{c8}; \\ \Lambda_{mi} &= \lambda_{mi,1} + \lambda_{mi,2} + 2(\lambda_{mi,3} + \lambda_{mi,4} + \lambda_{mi,5} + \lambda_{mi,6} + \lambda_{mi,7} + \lambda_{mi,8} + \lambda_{mi,9}); \\ \Lambda_{sj} &= \lambda_{sj,1} + 2(\lambda_{sj,2} + \lambda_{sj,3} + \lambda_{sj,4}). \end{aligned}$$

Структура векторов, входящих в (1), определяются следующими зависимостями:

$$\begin{aligned} \{\mathbf{P}\}^T &= \{P_0 \ \mathbf{P}_c \ \mathbf{P}_M \ \mathbf{P}_S\} = \{P_0 \ \mathbf{P}_c \ \mathbf{P}_{m1} \dots \mathbf{P}_{mi} \dots \mathbf{P}_{mN_m} \ \mathbf{P}_{s1} \dots \mathbf{P}_{sj} \dots \mathbf{P}_{sN_s}\}; \\ \{\dot{\mathbf{P}}\}^T &= \{P_0 \ \dot{\mathbf{P}}_c \ \dot{\mathbf{P}}_M \ \dot{\mathbf{P}}_S\} = \{\dot{P}_0 \ \dot{\mathbf{P}}_c \ \dot{\mathbf{P}}_{m1} \dots \dot{\mathbf{P}}_{mi} \dots \dot{\mathbf{P}}_{mN_m} \ \dot{\mathbf{P}}_{s1} \dots \dot{\mathbf{P}}_{sj} \dots \dot{\mathbf{P}}_{sN_s}\}; \\ \{\mathbf{P}_c\}^T &= \{P_{c,1} \ P_{c,2} \ P_{c,3} \ P_{c,4} \ P_{c,5} \ P_{c,6} \ P_{c,7} \ P_{c,8}\}; \\ \{\mathbf{P}_{mi}\}^T &= \{P_{mi,1} \ P_{mi,2} \ P_{mi,3} \ P_{mi,4} \ P_{mi,5} \ P_{mi,6} \ P_{mi,7} \ P_{mi,8} \ P_{mi,9}\}; \\ \{\mathbf{P}_{sj}\}^T &= \{P_{sj,1} \ P_{sj,2} \ P_{sj,3} \ P_{sj,4}\}; \\ \{\omega_{c\mu}\} &= \{\mu_{c1} \ \mu_{c2} \ \mu_{c3} \ \mu_{c4} \ \mu_{c5} \ \mu_{c6} \ \mu_{c7} \ \mu_{c8}\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\{\omega_{M\mu}\} &= \{\{\omega_{m\mu,1}\} \dots \{\omega_{m\mu,i}\} \dots \{\omega_{m\mu,N_m}\}\}; \\
\{\omega_{m\mu,i}\} &= \{\mu_{mi,1} \ \mu_{mi,2} \ \mu_{mi,3} \ \mu_{mi,4} \ \mu_{mi,5} \ \mu_{mi,6} \ \mu_{mi,7} \ \mu_{mi,8} \ \mu_{mi,9}\}; \\
\{\omega_{S\mu}\} &= \{\{\omega_{s\mu,1}\} \dots \{\omega_{s\mu,j}\} \dots \{\omega_{s\mu,N_s}\}\}; \\
\{\omega_{s\mu,j}\} &= \{\mu_{sj,1} \ \mu_{sj,2} \ \mu_{sj,3} \ \mu_{sj,4}\}; \\
\{\omega_{c\lambda}\}^T &= \{\lambda_{c1} \ \lambda_{c2} \ \lambda_{c3} \ \lambda_{c4} \ n_{ДО}\lambda_{c5} \ n_{ТС}\lambda_{c6} \ n_{Ш}\lambda_{c7} \ n_{Б}\lambda_{c8}\}; \\
\{\omega_{M\lambda}\}^T &= \{\{\omega_{m\lambda,1}\} \dots \{\omega_{m\lambda,i}\} \dots \{\omega_{m\lambda,N_m}\}\}; \\
\{\omega_{m\lambda,i}\}^T &= \{\lambda_{mi,1} \ \lambda_{mi,2} \ 2\lambda_{mi,3} \ 2\lambda_{mi,4} \ 2\lambda_{mi,5} \ 2\lambda_{mi,6} \ 2\lambda_{mi,7} \ 2\lambda_{mi,8} \ 2\lambda_{mi,9}\}; \\
\{\omega_{S\lambda}\}^T &= \{\{\omega_{s\lambda,1}\} \dots \{\omega_{s\lambda,j}\} \dots \{\omega_{s\lambda,N_s}\}\}; \\
\{\omega_{s\lambda,j}\}^T &= \{\lambda_{sj,1} \ 2\lambda_{sj,2} \ 2\lambda_{sj,3} \ 2\lambda_{sj,4}\}.
\end{aligned}$$

Структура матриц, входящих в (1), определяются следующими зависимостями:

- диагональные матрицы:

$$\begin{aligned}
diag[\Omega_{cc}] &= \{-\mu_{c1} \ -\mu_{c2} \ -\mu_{c3} \ -\mu_{c4} \ -\mu_{c5} \ -\mu_{c6} \ -\mu_{c7} \ -\mu_{c8}\}; \\
diag[\Omega_{MM}] &= \{[\Omega_{mm,1}] \dots [\Omega_{mm,i}] \dots [\Omega_{mm,N_m}]\}; \\
diag[\Omega_{mm,i}] &= \{-\mu_{mi,1} \ -\mu_{mi,2} \ -\mu_{mi,3} \ -\mu_{mi,4} \ -\mu_{mi,5} \ -\mu_{mi,6} \ -\mu_{mi,7} \ -\mu_{mi,8} \ -\mu_{mi,9}\}; \\
diag[\Omega_{SS}] &= \{[\Omega_{ss,1}] \dots [\Omega_{ss,j}] \dots [\Omega_{ss,N_s}]\}; \\
diag[\Omega_{ss,j}] &= \{-\mu_{sj,1} \ -\mu_{sj,2} \ -\mu_{sj,3} \ -\mu_{sj,4}\};
\end{aligned}$$

- нулевые матрицы: $[0]_{cM}$ размером $8 \times 9N_m$, $[0]_{cS}$ размером $8 \times 4N_s$ и $[0]_{MS}$ размером $9N_m \times 4N_s$.

Для отдельных подсистем (графы на рис. 4) их переход из исправного состояния в неисправное состояние будет выражаться системами уравнений следующего вида:

- для подсистемы общих элементов трансмиссии

$$\begin{Bmatrix} \dot{P}_{c,0} \\ \dot{\mathbf{P}}_c \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Lambda_c & \{\omega_{c\mu}\} \\ \{\omega_{c\lambda}\} & [\Omega_{cc}] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} P_{c,0} \\ \mathbf{P}_c \end{Bmatrix}; \quad (2)$$

- для подсистемы i -го ведущего моста

$$\begin{Bmatrix} \dot{P}_{mi,0} \\ \dot{\mathbf{P}}_{mi} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Lambda_{mi} & \{\omega_{m\mu,i}\} \\ \{\omega_{m\lambda,i}\} & [\Omega_{mm,i}] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} P_{mi,0} \\ \mathbf{P}_{mi} \end{Bmatrix}; \quad (3)$$

- для подсистемы j -го ведомого моста

$$\begin{Bmatrix} \dot{P}_{sj,0} \\ \dot{\mathbf{P}}_{sj} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Lambda_{sj} & \{\omega_{s\mu,j}\} \\ \{\omega_{s\lambda,j}\} & [\Omega_{ss,i}] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} P_{sj,0} \\ \mathbf{P}_{sj} \end{Bmatrix}; \quad (4)$$

где $P_{v,0}$ - вероятность нахождения v -й подсистемы в исправном состоянии.

Начальные условия для решения систем дифференциальных уравнений (1) – (4) включают множество значений вероятностей P_m в момент начала эксплуатации колесного

шасси (в момент начала эксплуатации трансмиссии и ее подсистем) при $\tau = \tau_0 = 0$. Принимая допущение, что в начальный момент времени все структурные элементы всех подсистем трансмиссии находятся в исправном состоянии, можно считать:

$$\begin{aligned}
P_0(\tau = 0) &= 1; \\
P_{c,0}(\tau = 0) &= 1; \\
P_{mi,0}(\tau = 0) &= 1; \\
P_{sj,0}(\tau = 0) &= 1.
\end{aligned}$$

Все остальные элементы векторов начальных условий равны 0.

Системы уравнений (1) - (4) позволяют прогнозировать процесс изменения во времени вероятности исправной работы трансмиссии $P_{rs}(\tau)$ и ее v -й подсистемы $P_v(\tau)$, так как

$$\begin{aligned}
P_{tr}(\tau) &= P_0(\tau); \quad P_{tr,c}(\tau) = P_{c,0}(\tau); \\
P_{tr,mi}(\tau) &= P_{mi,0}(\tau); \quad P_{tr,s}(\tau) = P_{sj,0}(\tau). \quad (5)
\end{aligned}$$

Решение систем (1) - (4) при начальных условиях позволяет выполнить моделирование графиков $P_{tr}(\tau)$, $P_{tr,c}(\tau)$, $P_{tr,mi}(\tau)$ и $P_{tr,sj}(\tau)$, характеризующих изменение во времени показателей надежности трансмис-

сии в целом и отдельных ее подсистем до момента первого планового ремонта $\tau_{r,1}$.

Проведение ремонтно-восстановительных операций в момент времени $\tau_{r,1}$ резко искажает вид этих графиков, так как в этот момент времени происходит скачкообразное повышение величины показателей надежности вследствие восстановления исходной надежности отремонтированных или замененных элементов. На рис. 5 приведен характерный график изменения во времени вероятности нахождения технического объекта $U_{rs}(\tau)$ и его подсистем в исправном состоянии при проведении периодических ремонтов и при их отсутствии [15], который справедлив и для трансмиссии многоосных специальных колесных шасси.

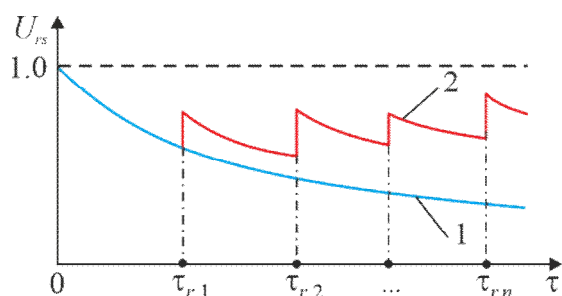


Рис. 5. График изменения во времени вероятности нахождения трансмиссии и ее подсистем в исправном состоянии (1 – без проведения ремонтов; 2 – с проведением ремонтов)

В момент времени $\tau_{r,1}$ производится ремонт одного или нескольких структурных элементов. Поэтому вероятность нахождения m -го элемента v -й подсистемы в неисправном состоянии скачкообразно уменьшаются от $P_{tr,v,m}(\tau_{r,1} - 0) = P_{tr,v,m}(\tau_{r,1})$ до значения $P_{tr,v,m}(\tau_{r,1} + 0) = 0$. Вероятность нахождения трансмиссии и ее подсистем в исправном состоянии скачкообразно увеличивается с $P_{tr}(\tau_{r,1} - 0) = P_{tr}(\tau_{r,1})$ или $P_{tr,v}(\tau_{r,1} - 0) = P_{tr,v}(\tau_{r,1})$ на величину суммы вероятностей $U_{tr,v,m}(\tau_{r,1})$ отремонтированных элементов. С момента $\tau_{r,1}$ интегрирование систем дифференциальных уравнений должно осуществляться при новых векторах начальных условий.

Необходимость ремонта m -го элемента v -й подсистемы во время i -го планового ремонта $\tau_{r,i}$ определяется периодичностью его ремонта или настройки $\Delta T_{v,m}$. Эта периодичность устанавливаемой эксплуатационной документацией.

Полученные таким образом откорректированные векторы $\{P\}$, $\{P_c\}$, $\{P_{mi}\}$ и $\{P_{sj}\}$ для момента времени окончания первого ремонта $\tau_{r,1}$ являются векторами начальных условий для дальнейшего интегрирования систем уравнений (1) – (4), заменив тем самым векторы начальных условий для момента времени $\tau = 0$.

Аналогично изменяются векторы начальных условий для других моментов времени $\tau_{r,n}$. Таким образом, процесс прогнозирования изменения во времени показателей надежности рассматриваемой трансмиссии и ее подсистем, определяющих их нахождение в исправном или неисправном состоянии, при проведении плановых ремонтных мероприятий элементов после не критического отказа (кривая 2 на рис. 5) сводится к поочередному интегрированию систем уравнений (1) – (4) в пределах последовательно расположенных временных интервалов $\tau_{r,n} \leq \tau \leq \tau_{r,n+1}$. Векторы начальных условий в начальной точке каждого интервала $\tau_{r,n}$ подлежат периодическому переформированию.

4. Компьютерная реализация модели

Разработанная методика моделирования процесса изменения во времени количественных показателей надежности трансмиссии многоосного колесного шасси и его структурных подсистем была реализована в виде компьютерной программы «Надежность_МКШ 1.0». Она позволяет моделировать кинетику показателей надежности трансмиссии, включающей суммарно во всех подсистемах до 200 структурных элементов, со сроком эксплуатации до 150 000 часов. Интегрирование системы дифференциальных уравнений первого порядка Колмогорова-Чепмена (1), являющееся ключевым процессом, а также дополнительных систем

уравнений (2) – (4) выполняется методом Рунге-Кутты IV порядка [16, 17]. Программа имеет библиотеку данных о интенсивности отказов и восстановлений характерных элементов, определяющих надежность трансмиссии многоосных колесных шасси.

Результатом выполнения данной программы является моделирование изменения во времени в течение заданного срока службы многоосного колесного шасси вероятностей нахождения трансмиссии в целом и ее структурных подсистем в исправном состоянии и в возможных состояниях, соответствующих некритическим отказам структурных элементов (с учетом ремонта тех отдельных элементов, которые исчерпали допустимый срок эксплуатации к моменту проведения очередного планового ремонта).

5. Анализ результатов расчета

В качестве примера применения разработанной методики прогнозирования кинетики

(изменения во времени) надежности многоосного колесного шасси в течение срока эксплуатации был выполнен расчет трансмиссии в целом и ее ключевых подсистем шасси с колесной формулой 12х10 в пределах пробега 100 тыс. км.

Использованные при расчете исходные данные применительно к количественной оценке интенсивности отказов структурных элементов трансмиссии указаны в табл. 2. Количественные значения интенсивности отказов назначены на основании информации, имеющейся с технической литературе [18 - 21]. Указанные количественные значения интенсивности отказов используются в иллюстративных целях. При расчетах надежности трансмиссий конкретных исполнений многоосных колесных шасси необходимо использование уточненных значений интенсивности отказов, соответствующих типоразмерам структурных элементов этих шасси.

Таблица 2

Исходные данные для примера расчета

Обозначение	Номер	Структурный элемент	Интенсивность отказа $\lambda \cdot 10^7, \text{ км}^{-1}$
<i>Подсистема общих элементов трансмиссии</i>			
С	c_1	Сцепление	3,0
Кп	c_2	Коробка передач	0,6
Кр	c_3	Коробка раздаточная	2,0
Дц	c_4	Дифференциал центральный	1,0
До	c_5	Дифференциал межосевой	0,4
Тс	c_6	Тормоз стояночный	0,05
Ш	c_7	Шарнир карданный	0,3
В	c_8	Вал карданный	0,2
<i>Подсистема i-го ведущего моста</i>			
Дк _i	$m_{i,1}$	Дифференциал межколесный	0,8
Рм _i	$m_{i,2}$	Редуктор моста	2,0
Рк _i	$m_{i,3}$	Редуктор колесный	3,0
О _i	$m_{i,4}$	Полуось	0,15
Ш _i	$m_{i,5}$	Шарнир карданный	0,2
К _i	$m_{i,6}$	Колесо	0,1
Шс _i	$m_{i,7}$	Шарнир равных угловых скоростей карданный	0,2
Ф _i	$m_{i,8}$	Соединение фланцевое	0,01
Тк _i	$m_{i,9}$	Тормоз колесный	0,2

Окончание табл. 2

Обозначение	Номер	Структурный элемент	Интенсивность отказа $\lambda \cdot 10^7, \text{км}^{-1}$
<i>Подсистема j-го ведомого моста</i>			
$K_{гj}$	$s_{j,1}$	Картер главной передачи	0,1
$Ов_j$	$s_{j,2}$	Полуось	0,15
K_j	$s_{j,3}$	Колесо	0,1
$Тк_j$	$s_{j,4}$	Тормоз колесный	0,2

На рис. 6 приведен график, характеризующий кинетику (изменение во времени) вероятности исправной работы трансмиссии

в целом. Пробег между ремонтами (техническими обслуживаниями) был принят в размере 10 тыс. км.

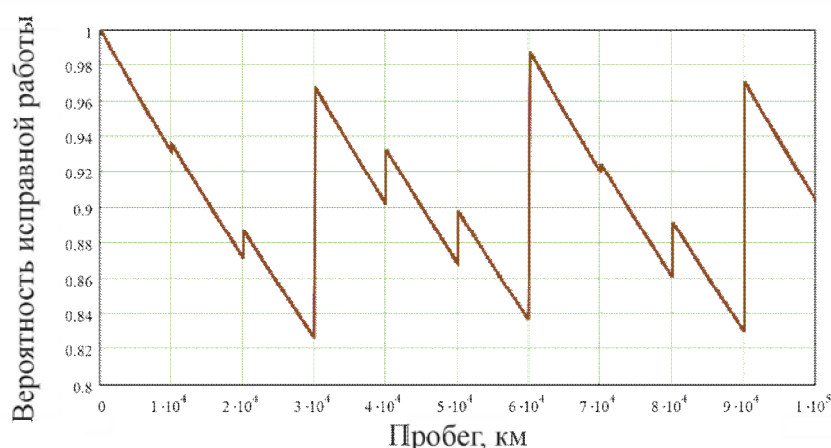


Рис. 6. Изменение вероятности исправной работы трансмиссии многоосного колесного шасси в течение срока эксплуатации

Замена или восстановление конструктивных элементов позволяют периодически повышать вероятность исправной работы трансмиссии многоосного колесного шасси и, таким образом, эффективно противостоять объективной тенденции монотонного снижения его надежности по мере эксплуатации (кривая 1 на рис. 5).

6. Заключение

По результатам выполненного исследования можно сделать следующие выводы.

Разработана методика прогнозирования кинетики (изменения во времени и в зависимости от пробега) количественных показателей надежности трансмиссии и ее основных подсистем в течение срока эксплуатации многоосного колесного шасси. Методика позволяет прогнозировать вероятности исправного и неисправного состояния трансмиссии

в целом и ее ключевых подсистем (подсистемы общего оборудования трансмиссии, подсистем ведущих мостов и подсистем ведомых мостов) в произвольный момент времени эксплуатации и после произвольного пробега в течение срока службы многоосных колесных шасси с различным числом ведущих и ведомых осей. Она также учитывает изменение величин вероятности исправного и неисправного состояния трансмиссии в целом и ее ключевых подсистем после проведения ремонтов или технических обслуживаний в назначенные моменты времени или после назначенного пробега.

Приведенный расчет носит иллюстративный характер и позволяет визуально оценить результаты использования разработанной методики. При расчетах надежности трансмиссий конкретных исполнений многоосных колесных шасси необходимо использование уточненных значений интенсивности отка-

зов, соответствующих типоразмерам структурных элементов этих шасси.

Разработанная методика также может быть использована для количественной оценки индивидуальных вкладов конкретных подсистем трансмиссии и ее конкретных структурных элементов в снижение вероятности исправного состояния в зависимости от их индивидуальной надежности (выра-

жаемой величиной интенсивности отказов) и продолжительности между ремонтами (техническими обслуживаниями). Методика также может быть использована для количественной оценки эффективности технических мероприятий, связанных с повышением уровня надежности структурных элементов трансмиссии.

Список литературы

1. Белоусов Б.Н., Попов С.Д. Колесные транспортные средства особо большой грузоподъемности. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 728 с.
2. Гладов Г.И., Вихров А.В., Зайцев С.В., Кувшинов В.В., Павлов В.В. Конструкции многоцелевых гусеничных и колесных машин. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 400 с.
3. Аксенов П.В. Многоосные автомобили. М.: Машиностроение, 1989. 280 с.
4. Бочаров Н.Ф., Цитович И.С., Полунган А.А., Семенов В.М., Цыбин В.С., Жеглов Л.Ф. Конструирование и расчет колесных машин высокой проходимости. М.: Машиностроение, 1983. 299 с.
5. Веселов Н.Б. Вездеходные транспортно-технологические машины. Конструкции. Конструирование и расчет. Нижний Новгород: РИ «Бегемот», 2010. 320 с.
6. Лагерева И.А. Моделирование рабочих процессов манипуляционных систем мобильных многоцелевых транспортно-технологических машин и комплексов. Брянск: РИО БГУ, 2016. 371 с. DOI: 10.5281/zenodo.1198980.
7. Таричко В.И., Лагерева И.А., Черных А.А. Компьютерное моделирование режимов движения мобильной транспортно-технологической машины // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. №1. С. 136-143. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-01-136-143
8. Mahale Y., Kolhar S., More A.S. A comprehensive review on artificial intelligence driven predictive maintenance in vehicles: Technologies, challenges and future research

References

1. Belousov B.N., Popov S.D. *Kolesnye transportnye sredstva osobo bolshoy gruzopodemnosti* [Wheeled vehicles of extra heavy duty]. Moscow, Izdatelstvo MGTU imeni N.E. Bauman, 2006. 728 p. (In Russian)
2. Gladov G.I., Vikhrov A.V., Zaytsev S.V., Kuvshinov V.V., Pavlov V.V. *Konstruktzii mnogotselovykh gusenichnykh i kolesnykh mashin* [Designs of multipurpose tracked and wheeled vehicles]. Moscow, Izdatelskiy tsentr «Akademiya», 2010. 400 p. (In Russian)
3. Aksenov P.V. *Mnogoosnye avtomobili* [Multi-axle cars]. Moscow, Mashinostroenie, 1989. 280 p. (In Russian)
4. Bocharov N.F., Tsitovich I.S., Polungyan A.A., Semenov V.M., Tsybin V.S., Zhelglov L.F. *Konstruirovaniye i raschet kolesnykh mashin vysokoy prokhodimosti* [Design and calculation of high-traffic wheeled vehicles]. Moscow, Mashinostroenie, 1983. 299 p. (In Russian)
5. Veselov N.B. *Vezdekhodnye transportno-tekhnologicheskie mashiny. Konstruktsii. Konstruirovaniye i raschet* [All-terrain transport and technological vehicles. Constructions. Design and calculation]. Nizhniy Novgorod, RI Begemot, 2010. 320 p. (In Russian)
6. Lagerev I.A. *Modelirovaniye rabochikh protsessov manipulyatsionnykh sistem mobilnykh mnogotselovykh transportno-tekhnologicheskikh mashin i kompleksov* [Modeling of work processes in manipulation systems for mobile multi-purpose transport and technological machines and complexes]. Bryansk, RIO BGU, 2016. 371 p. DOI: 10.5281/zenodo.1198980 (In Russian)
7. Tarichko V.I., Lagerev I.A., Chernykh

directions // *Discovery Applied Science*. 2025. No. 7. P. 243. DOI: 10.1007/s42452-025-06681-3

9. Nalubowa M., Namango S., Ochola J., Mubiru P.K. Application of Markov chains in manufacturing systems: A review // *International Journal of Industrial Engineering and Operational Research*. 2021. Vol. 3. No.1.

10. Vesely W.E., Goldberg F.F., Roberts N.H., Haasl D.F. Fault tree handbook. Washington: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1981. 209 p.

11. Лагереv А.В., Лагереv И.А. Общий подход к созданию цифровых двойников мобильных канатных дорог на основе мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2022. № 1. С. 38-60. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-01-38-60

12. Da Silva M.R., de Oliveira L.S., de Bessa I.V. de Carvalho F.A., de Medeiros R.L.P., de Lucena V.F. Digital Twin Applications: A Survey of Recent Advances and Challenges // *Processes*. 2022. No. 10. P. 744. DOI: 10.3390/pr10040744

13. Лагереv А.В., Лагереv И.А., Таричко В.И. Моделирование рабочих процессов мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов. Брянск: РИСО БГУ, 2021. 204 с. DOI: 10.5281/zenodo.6044972

14. Ross Sh.M. Chapman–Kolmogorov Equations. Introduction to Probability Models. San Diego: Elsevier, 2014. P. 187.

15. Лагереv А.В., Таричко В.И., Лагереv И.А. Вероятностно-временной анализ кинетики показателей надежности на стадии проектирования канатной системы мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2020. №2. С. 256-275. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-02-256-275.

16. Крылов Н.В., Бобков В.В., Монастырный П.И. Вычислительные методы. Т.2. Москва: Наука, 1977. 400 с.

17. Арушанян О.Б., Залеткин С.Ф. Решение систем обыкновенных дифференциальных уравнений методами Рунге–Кутты. Москва: МГУ, 2014. 58 с.

A.A. Motion modes simulation of a mobile transport and technological machine. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.1, pp. 136-143. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-01-136-143 (In Russian)

8. Mahale Y., Kolhar S., More A.S. A comprehensive review on artificial intelligence driven predictive maintenance in vehicles: Technologies, challenges and future research directions. *Discovery Applied Science*, 2025, No. 7, pp. 243. DOI: 10.1007/s42452-025-06681-3

9. Nalubowa M., Namango S., Ochola J., Mubiru P.K. Application of Markov chains in manufacturing systems: A review. *International Journal of Industrial Engineering and Operational Research*, 2021, Vol. 3, No.1.

10. Vesely W.E., Goldberg F.F., Roberts N.H., Haasl D.F. Fault tree handbook. Washington: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1981. 209 p.

11. Lagerev A.V., Lagerev I.A. A general approach to the creation of digital twins of mobile ropeways based on mobile transport and reloading rope units. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.1, pp. 38-60. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-01-38-60 (In Russian)

12. Da Silva M.R., de Oliveira L.S., de Bessa I.V. de Carvalho F.A., de Medeiros R.L.P., de Lucena V.F. Digital Twin Applications: A Survey of Recent Advances and Challenges. *Processes*, 2022, No. 10, pp. 744. DOI: 10.3390/pr10040744

13. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. *Modelirovanie rabochnik protsessov mobilnykh transportno-peregruzochnykh kanatnykh kompleksov* [Modeling of working processes of mobile transporting and overloading rope facilities]. Bryansk, RISO BGU, 2021. 204 p. DOI: 10.5281/zenodo.6044972. (In Russian)

14. Ross Sh.M. Chapman–Kolmogorov Equations. Introduction to Probability Models. San Diego: Elsevier, 2014. P. 187.

15. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. Probability-temporal analysis of reliability indicators kinetics at the stage of designing a rope system of a mobile transport and reload-

15. Интенсивность отказов элементов: справочник [Электронный ресурс]. – URL: <https://areliability.com/intensivnost-otkazov-elementov-spravochnik/> (дата обращения 25.08.2025).

19. Denson W., Chandler G., Crowell W., Wanner R. Nonelectronic Parts Reliability Data. Chicago: IIT Research Institute, 1991. 632 p.

20. Electronic Reliability Design Handbook (MIL-HDBK-338B). New York: Air Force Research Laboratory Information, 1999. 1046 p.

21. Dhillon B.S. Engineering maintenance: a modern approach. Boca Raton: CRC Press LLC, 2000. 222 p.

ing ropeway. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.2, pp. 256-275. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-02-256-275 (In Russian)

16. Krylov N.V., Bobkov V.V., Monastyrnyy P.I. *Vychislitelnye metody. T.2* [Computational methods. Vol. 2]. Moscow, Nauka, 1977. 400 p. (In Russian)

17. Arushanyan O.B., Zaletkin S.F. *Reshenie sistem obyknovennykh differentsialnykh uravneniy metodami Runge–Kutta* [Solving systems of ordinary differential equations by Runge–Kutta methods]. Moscow, MGU, 2014. 58 p. (In Russian)

15. *Intensivnost otkazov elementov: spravochnik* [Element Failure Rate: Reference] [site]. Available at: <https://areliability.com/intensivnost-otkazov-elementov-spravochnik/> (accessed 03 Aug. 2025). (In Russian)

19. Denson W., Chandler G., Crowell W., Wanner R. Nonelectronic Parts Reliability Data. Chicago, IIT Research Institute, 1991. 632 p.

20. Electronic Reliability Design Handbook (MIL-HDBK-338B). New York, Air Force Research Laboratory Information, 1999. 1046 p.

21. Dhillon B.S. Engineering maintenance: A modern approach. Boca Raton, CRC Press LLC, 2000. 222 p.

УДК (УДК) 62-791.2 / 62-97

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ПРИБОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАГРУЖЕННОСТИ
ПРИВОДНОЙ РОЛИКОВОЙ ЦЕПИ КОНВЕЙЕРА ДЛЯ ПАЛЛЕТASSAY RESULTS OF THE DEVICE FOR MEASURING THE LOAD OF THE DRIVE
ROLLER CHAIN OF THE PALLET CONVEYORФомин Н.А., Хлопков В.П., Носко А.Л., Сафронов Е.В.
Fomin N.A., Khlopkov V.P., Nosko A.L., Safronov E.V.Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Москва, Россия)
Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russian Federation)

Аннотация. В статье обоснована необходимость проведения экспериментального исследования статических и динамических нагрузок в приводной роликовой однорядной цепи роликовых конвейеров для паллет. Разработан беспроводной малогабаритный прибор на основе тензометрического датчика и плат Arduino, сконструированного по принципу полного моста, для измерения усилий во внешних пластинах приводной роликовой цепи конвейера для паллет, позволяющего получать данные с различной частотой. Проведены в реверсивном режиме испытания на натурном стенде приводного роликового конвейера для паллет с цепной передачей. Получены результаты экспериментальных исследований, состоящих из предварительной тарировки, статических и динамических испытаний. Для фильтрации полученных результатов от высокочастотных шумов была произведена обработка полученных результатов с использованием быстрого преобразования Фурье в программе Excel. Проведено сравнение исходных, усредненных и отфильтрованных результатов на 25 повторениях эксперимента с использованием различных частот съема данных. Проанализированы полученные результаты измерения усилий в приводной роликовой цепи. Приведены выводы и даны рекомендации по использованию прибора с частотами 12,5 Гц и 16,7 Гц для съема данных.

Ключевые слова: паллетные роликовые конвейеры, роликовая цепь, тензометрия, прибор для измерения деформаций, колебания цепи.

Дата получения статьи: 10.03.2025
Дата принятия к публикации: 16.06.2025
Дата публикации: 25.09.2025

Сведения об авторах:

Фомин Никита Алексеевич – аспирант кафедры «Подъемно-транспортные системы», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана); e-mail: 89032721182@mail.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0201-0912>

Abstract. The article substantiates the need for an experimental study of static and dynamic loads in a single-row roller chain of roller conveyors for pallets. A small-sized wireless device based on a strain gauge and Arduino boards, designed on the principle of a full bridge, has been developed to measure forces in the outer plates of the drive roller chain of a pallet conveyor, which allows data to be received at different frequencies. The tests on a full-scale stand of a drive roller conveyor for pallets with a chain transfer, carried out in a reversible mode of operation, are described. The results of a series of experimental studies consisting of preliminary calibration, static and dynamic parts are presented. To filter the obtained results from high-frequency noise, the obtained results were processed using the fast Fourier transform in Excel. We also compared the initial, averaged, and filtered results on 25 repetitions of the experiment using different data acquisition frequencies. The obtained results of measuring forces in a drive roller chain are analyzed and conclusions and recommendations for further use of the device are the most appropriate data acquisition frequencies of 12.5 Hz and 16.7 Hz are presented.

Keywords: pallet roller conveyors, roller chain; strain gauge; strain gauge; chain vibration.

Date of manuscript reception: 10.03.2025
Date of acceptance for publication: 16.06.2025
Date of publication: 25.09.2025

Authors' information:

Nikita A. Fomin - post-graduate of Department «Hoisting and transport systems» at Bauman Moscow State Technical University;
e-mail: 89032721182@mail.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0201-0912>

Хлопков Владимир Петрович – аспирант кафедры «Подъемно-транспортные системы», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана); *e-mail: v.p.khlopkov@mail.ru*.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0047-9637>

Носко Андрей Леонидович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Подъемно-транспортные системы», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана); *e-mail: dr.nosko@mail.ru*.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1382-4095>

Сафронов Евгений Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные системы», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана); *e-mail: gen-s@mail.ru*.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4250-7147>

Vladimir P. Khlopkov – post-graduate of Department «Hoisting and transport systems» at Bauman Moscow State Technical University;

e-mail: v.p.khlopkov@mail.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0047-9637>

Andrey L. Nosko - Doctor of Science (Eng.), Professor, Deputy head of Department «Hoisting and transport systems» at Bauman Moscow State Technical University; *e-mail: dr.nosko@mail.ru*.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1382-4095>

Evgeniy V. Safronov - Candidate of Science, Associate Professor of Department «Hoisting and transport systems» at Bauman Moscow State Technical University; *e-mail: gen-s@mail.ru*.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4250-7147>

1. Введение

Цепные передачи широко применяются в приводных роликовых конвейерах для паллет [1, 2], в которых в качестве приводных цепей используются роликовые однорядные цепи (рис. 1) [3] по причине их надежности, долговечности и способности воспринимать большие статические и динамические нагрузки.

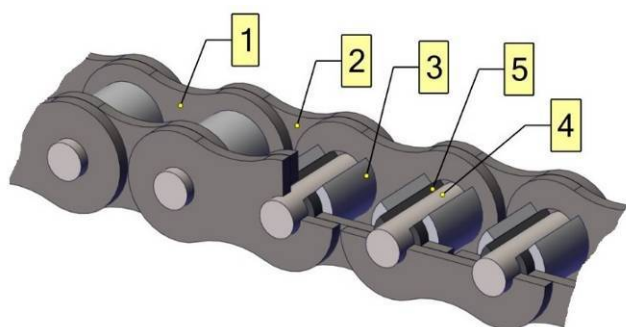


Рис. 1. Роликовая однорядная цепь:

1 – внутренняя пластина; 2 – наружная пластина; 3 – ролик; 4 – валик; 5 – втулка

Особенностями работы приводных роликовых конвейеров для паллет являются частые пуски и остановки, реверсивный режим работы, наличие большого количества обводных звездочек и т.п., которые характеризуются ударным динамическим воздействи-

ем на цепь и связанных с ней деталей и узлов конвейера [4, 5].

Существующие методики расчета приводных роликовых конвейеров [6 – 14] не учитывают этих особенностей. Поэтому требуется корректировка подходов к методам расчета таких конвейеров, и, прежде всего, к их тяговому расчету, а также проведение экспериментальных исследований статических и динамических нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации цепных передач приводных роликовых конвейеров для паллет.

Анализ методов определения напряженно-деформированного состояния элементов конструкций [15 – 18] показал, что для измерения усилий в пластинах роликовой однорядной цепи приводных роликовых конвейеров для паллет наиболее целесообразно использовать метод, основанный на тензометрическом измерении усилий.

Цель работы — создание беспроводного малогабаритного прибора для измерения усилий, возникающих в пластинах приводной роликовой однорядной цепи и проверка его работоспособности.

2. Эксперимент и оборудование

2.1. Прибор

На кафедре подъемно-транспортных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана создан беспроводной малогабаритный прибор для измерения усилий в пластинах роликовой однорядной цепи в процессе ее работы.

Прибор разработан на базе плат Arduino Nano. Схемы подключения плат представлены на рис. 2 и рис. 3. Платы и тензодатчик, представленные на рис. 2, расположены на цепи при помощи корпусов (рис. 4), напечатанных на 3D-принтере. Платы, представленные на рис. 3, расположены в корпусах, размещенных на металлоконструкции конвейера (рис. 5).

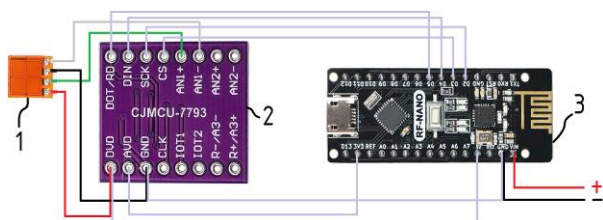


Рис. 2. Схема подключения плат передатчика:
 1 – тензодатчик с полным мостом;
 2 – AD7793BRU 24 бит ADC; 3 – RF-Nano
 Arduino Nano V3.0

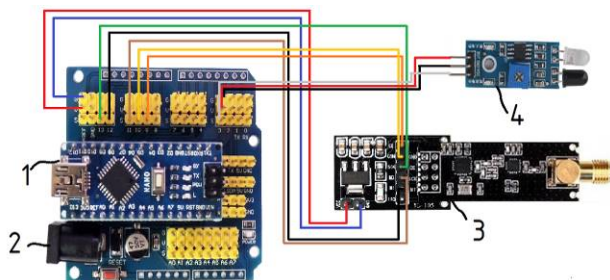


Рис. 3. Схема подключения плат приемника:
 1 – Arduino Nano V3.0; 2 – плата расширение
 для Arduino Nano; 3 – беспроводной модуль
 с переходником; 4 – инфракрасный датчик
 приближения

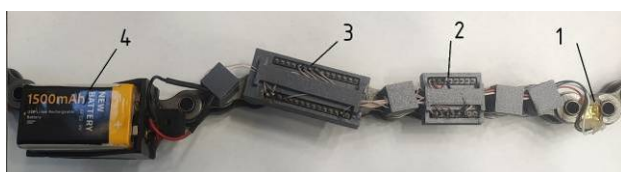


Рис. 4. Расположение корпусов плат на цепи:
 1 – тензодатчик с полным мостом;
 2 – AD7793BRU 24 бит ADC; 3 – RF-Nano
 Arduino Nano V3.0. 4 – батарейка

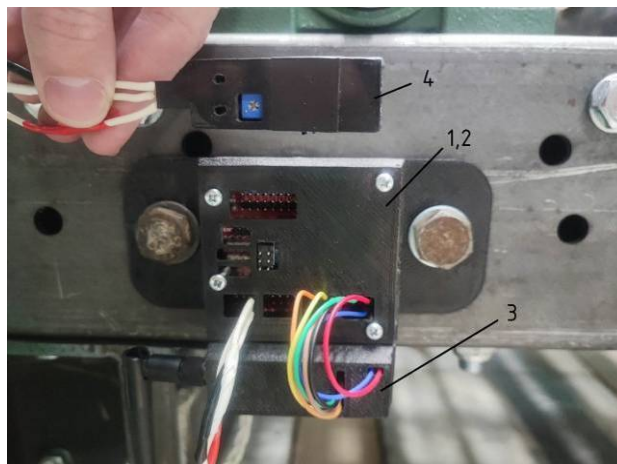


Рис. 5. Расположение корпусов плат на
 металлоконструкции конвейера: 1 – Arduino
 Nano V3.0; 2 – плата расширение для Arduino
 Nano; 3 – беспроводной модуль с
 переходником; 4 – инфракрасный датчик
 приближения

Тензометрический датчик наклеен с внешней стороны наружной пластины приводной роликовой однорядной цепи 10В-1 с полый осью (рис. 6) при помощи эпоксидного клея, контакты зафиксированы термоклем для защиты от перегиба и влияния датчика на съем данных. Тензометрический датчик работает по принципу полного моста, который подробно описан в работе [16].

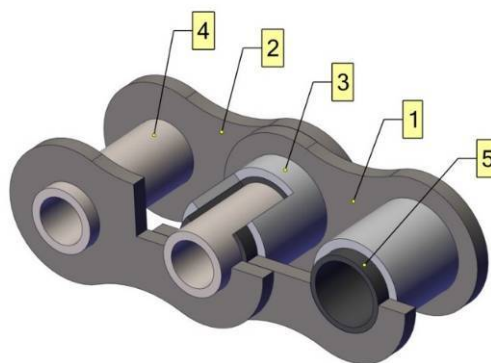


Рис. 6. Роликовая однорядная цепь с полыми
 втулками: 1 – внутренняя пластина;
 2 – наружная пластина; 3 – ролик;
 4 – полая ось; 5 – втулка

2.2. Стенд

Исследования цепи проводились на стенде кафедры РК4 «Подъемно-транспортные

системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, который предназначен для проведения натурных испытаний приводных роликовых конвейеров для паллет с цепной передачей в реверсивном режиме работы. Общий вид стенда представлен на рис. 7.

В качестве привода стенда используется мотор-редуктор со следующими характеристиками:

- тип привода — асинхронный NMRV-50-60-46,7-74-V5;
- напряжение питания 220В;
- частота питающей сети 50 Гц;
- мощность 0,55 кВт.

Управление направлением вращения двигателя стенда осуществляется по релейной схеме.

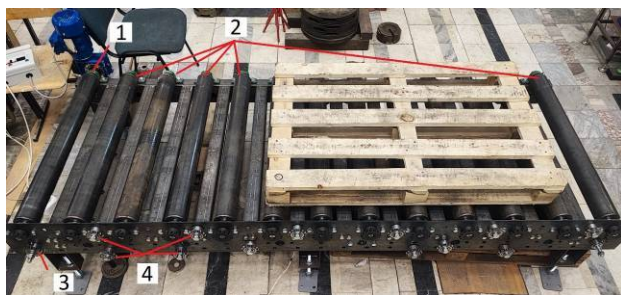


Рис. 7. Общий вид стенда (без цепи) для проведения натурных испытаний приводных роликовых конвейеров для паллет с цепной передачей: 1 – приводной ролик; 2 – ведомые ролики; 3 – натяжная звездочка; 4 – обводные звездочки

2.3. Режим испытаний

Основными задачами эксперимента являются – проверка работоспособности прибора и определение значений рабочих частот прибора для проведения натурных испытаний приводных роликовых конвейеров для паллет с цепной передачей в режимах эксплуатации.

Эксперимент проводился в статическом и динамическом режимах.

В статическом режиме осуществлялась тарировка прибора. В динамическом режиме проводился эксперимент.

2.4. Методика проведения эксперимента

Методика проведения эксперимента состояла из тарировки прибора и динамических испытаний. Для определения рабочей частоты съема данных была проведена экспериментальная проверка на нормальность их распределения с частотами, представленными в табл. 1.

2.5. Тарировка

Наличие в системе прибора большого количества электронных компонентов создает высокочастотный шум различных колебаний (>1 Гц). Для решения проблемы было использовано быстрое преобразование Фурье в программе Excel.

Тарировка проводилась непосредственно перед экспериментом и осуществлялась следующим образом:

- нахождение «условного нуля» (показания прибора без нагрузки);
- нагружение прибора грузом с шагом 10 кг (рис. 8).

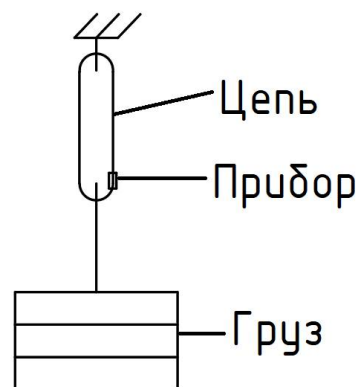


Рис. 8. Схема статического нагружения цепи

2.6. Эксперимент

Эксперимент проводился в установившемся динамическом режиме (без ускорений/торможений) без груза при скорости перемещения цепи 0,17 м/с. Частота съема данных изменялась ступенчато (табл. 1). Перед каждым экспериментом проводилась тарировка прибора. Эксперименты проводились при комнатной температуре.

На первом этапе эксперимента осуществлялась проверка адекватности статических

Таблица 1

Время замера							
Номер эксперимента	1	2	3	4	5	6	7
Частота, Гц	10,0	12,5	16,7	19,6	33,3	39,2	62,5
Время замеров, с	105	85	65	55	35	55	35

данных, получаемых с прибора (проверка на нормальность распределения) [19].

Общее количество экспериментов — 7 (табл. 1).

По результатам замеров (тарировки) были получены гистограммы распределения данных и графики квантиль-квантиль, из которых можно сделать вывод, что частоты 10,0 и 62,5 Гц периодически выдают данные, не укладывающиеся в нормальный ряд. Вместе с этим, на частотах 16,7 и 62,5 Гц больше всего показателей, не выходящих за пределы 10% от среднего. Однако, на частоте 62,5 Гц есть показатели, выходящие за границы критических значений. По предварительной оценке можно сделать вывод, что частота 16,7 Гц является наиболее предпочтительной.

Вторым этапом эксперимента было получение и анализ динамических данных.

Обрабатывались результаты 25 оборотов по часовой стрелке и 25 оборотов против часовой стрелки. В случае получения некор-

ректных данных на одном обороте, он исключается, так как имеет пренебрежительно малое влияние.

Для оценки адекватности полученных динамических данных необходимо создание фильтра на основе быстрого преобразования Фурье. Целью применения фильтра является уменьшение влияния высокочастотных колебаний системы, например, высокочастотных колебаний элементов плат Arduino, или компенсации неравномерного движения цепи по звездочке, которая обусловлена кинематикой цепной передачи [6]. Частота колебаний ускорения/торможения цепи будет рассчитана далее.

Проверка работоспособности быстрого преобразования Фурье проводилась на статических данных (тарировке). Данное преобразование в программе Excel требует кратное степени двойки количество значений. Примером полученного результата является график (рис. 9).

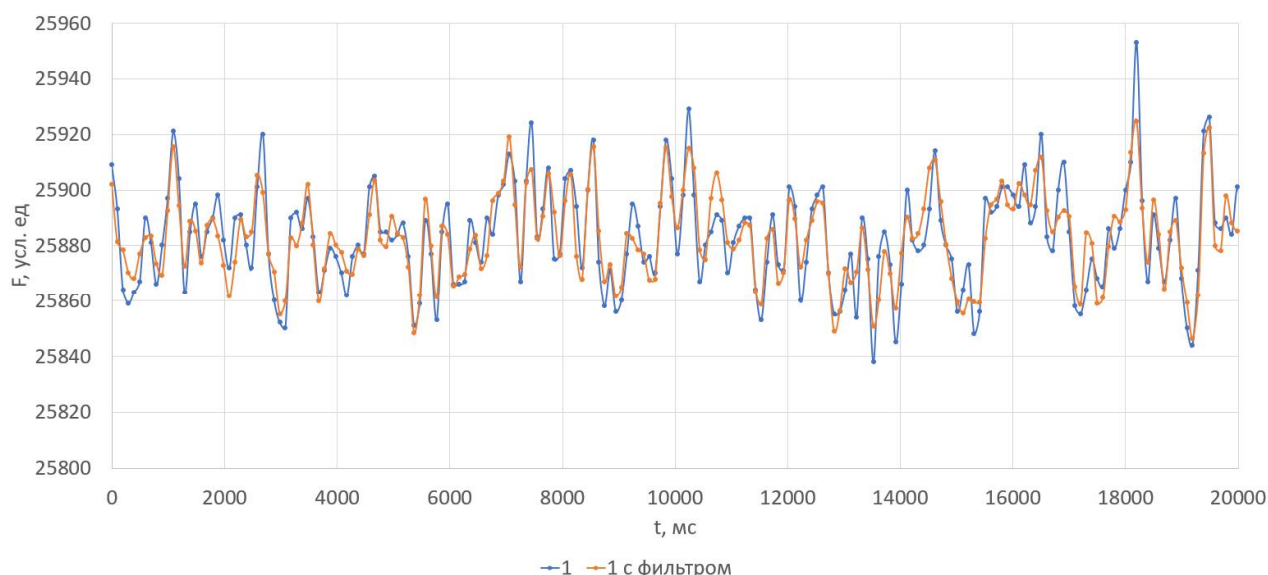


Рис. 9. Результаты быстрого преобразования Фурье. Эксперимент 1. Тарировка. Статические данные цепи (синий — исходные данные; оранжевый — отфильтрованные данные): по горизонтали — время, мс; по вертикали — условные единицы нагрузки (исходные данные тензорезистора)

Построение графика осуществлялось следующим образом. Исходные данные подвергались прямому быстрому преобразованию Фурье, в результате которого получается столбец комплексных данных. Далее из этого столбца выделяются гармоники их амплитуды. Затем часть гармоник зануляется. Остаются только гармоники, частота которых ниже пороговой частоты или амплитуда выше пороговой амплитуды. Для статических данных порог частоты был назначен 0 Гц, а порог амплитуды – 35% от максимального значения. Полученные гармоники и амплитуды комбинируются в новый столбец комплексных данных. Данный столбец подвергается обратному быстрому преобразованию Фурье.

Как видно из графика, на статических данных фильтр практически не оказывает влияния на полученные результаты и его можно не использовать.

Схема точек съема динамических данных для частоты 10 Гц при движении цепи по часовой стрелке представлена на рис. 10, а против часовой стрелки — на рис. 11.

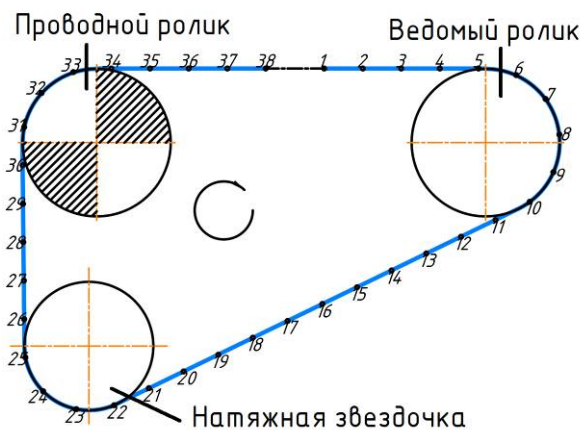


Рис. 10. Типовое расположение точек съема данных с частотой 10 Гц для первого оборота цепи по часовой стрелке

Частота ускорений/торможений цепи (продольные колебания цепи) вычислялась следующим образом:

- определялась круговая частота вращения приводной и неприводной звездочек;
- определялась частота оборотов звездочек;
- полученная частота умножалась на количество зубьев звездочек.

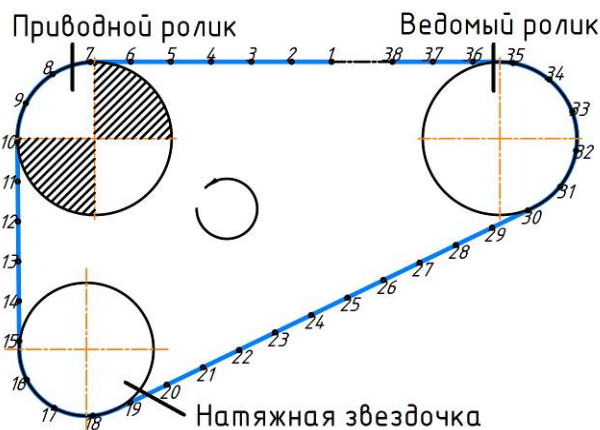


Рис. 11. Типовое расположение точек съема данных с частотой 10 Гц для первого оборота цепи против часовой стрелки

Полученная величина, измеряемая в Гц, является частотой динамического процесса зацепления цепи и зубьев звездочки. В формулах это выглядит следующим образом:

$$\omega = \frac{v}{R}; n = \frac{\omega}{2\pi}; N_2 = 10,74,$$

где ω - круговая частота вращения звездочки, рад/с; v - линейная скорость перемещения груза/цепи м/с; R - радиус ролика/делительной окружности звездочки, м; n - частота оборотов звездочек, Гц; N - частота динамического процесса нахождения цепи на зуб звездочки, Гц; Z - количество зубьев звездочки, шт.

Учтем следующие данные: $v_{cp} = 0,2$ м/с — скорость перемещения паллеты по роликовому полотну; $R_p = 44,5$ мм - радиус ролика; $R_1 = 33,22$ мм - радиус звездочки 1 (рис. 10, натяжная звездочка); $R_2 = 38,23$ мм - радиус звездочки 2 (рис. 10, приводной/ведомый ролик); $Z_1 = 13$ шт - число зубьев звездочки 1; $Z_2 = 15$ шт - число зубьев звездочки 2.

Звездочка 1 находится на ролике, поэтому их круговые скорости равны, а линейные находятся в пропорциональной зависимости от радиуса.

Подставляя исходные данные в формулы, получаем, что круговая частота вращения звездочки 2 равна $\omega_2 = 4,494$ рад/с, а круго-

вая частота вращения звездочки 1 - $\omega_1 = 5,178$ рад/с.

Далее получаем, что частота оборотов звездочки 1 равна $n_1 = 0,825$ Гц, а звездочки 2 - $n_2 = 0,716$ Гц.

С учетом количества зубьев на звездочках, получаем $N_1 = 10,73$ Гц, $N_2 = 10,74$ Гц.

Сравнивая между собой исходные данные, отфильтрованные (рис. 12) и схему движения датчика (рис. 10), можно отметить, что на некоторых участках натяжение цепи не согласуется с общепринятыми теориями расчета [6 - 14]. Например, на участке 11...22 (1100...2200 мс) должна наблюдаться убывающая прямая, а не пик данных в точке 18 (1800 мс). Вместе с этим, если проанализировать 25 оборотов (рис. 13) и выделить среднее (рис. 14), то эти данные будут примерно соответствовать принятым теориям. Однако, если сравнить со средним отфильтрованных данных (рис. 14), видно значительное искажение отфильтрованных данных на том же участке 11...22 (1100...2200 мс).

Тенденция повторяется и на графиках 25-ти оборотов против часовой стрелки. Для подтверждения данных было проведено

сравнение для всех использовавшихся в эксперименте частот.

3. Заключение

На основании анализа результатов испытаний прибора для измерения нагруженности приводной роликовой цепи конвейера для паллет установлено, что:

- созданный беспроводной малогабаритный прибор для измерения усилий в пластинах приводной роликовой однорядной цепи конвейеров для паллет показал свою работоспособность;
- полученные с помощью прибора результаты укладываются в нормальное распределение при уровне значимости 0,01;
- 99,5% полученных с помощью прибора данных укладываются в диапазон 3σ ;
- основной причиной возникновения в процессе экспериментальных исследований паразитных шумов являются поперечные колебания цепи при ее неравномерном движении;
- продольные колебания, вызванные заходом цепи на звездочку, существенного влияния на показания прибора не оказывают.

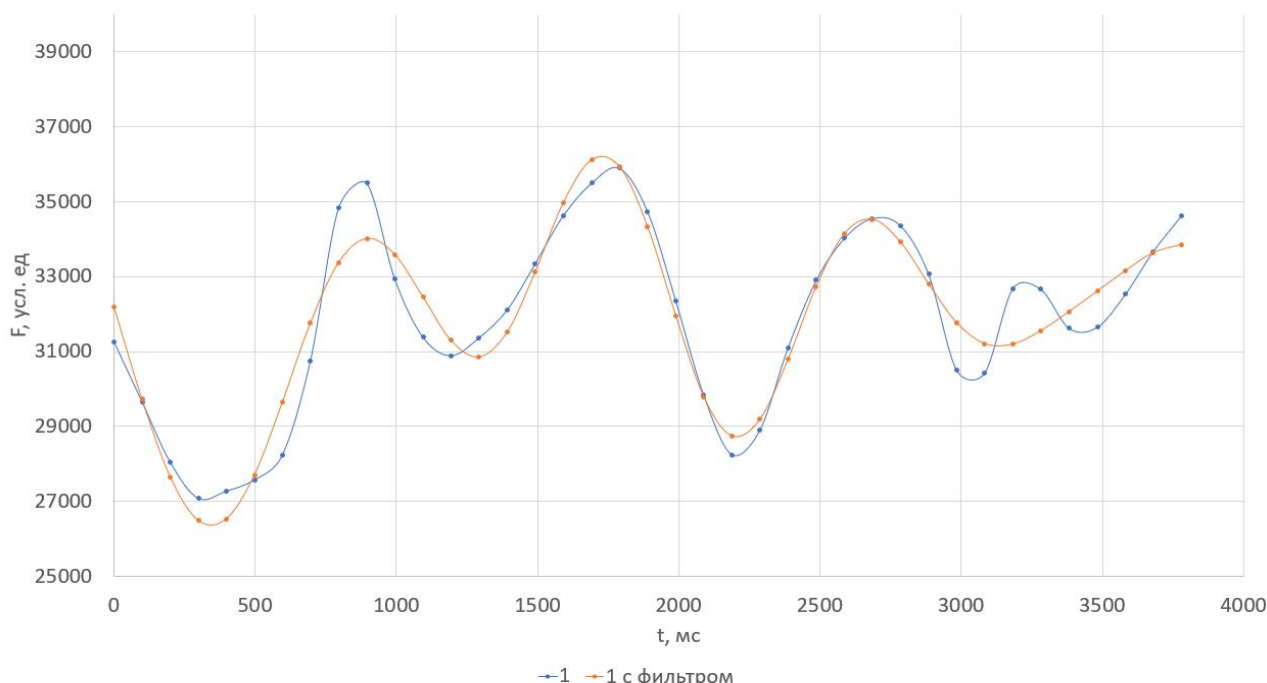


Рис. 12. Исходные и отфильтрованные данные 1-го оборота по часовой стрелке на частоте съема данных 10 Гц (синий – исходные данные; оранжевый – отфильтрованные данные)

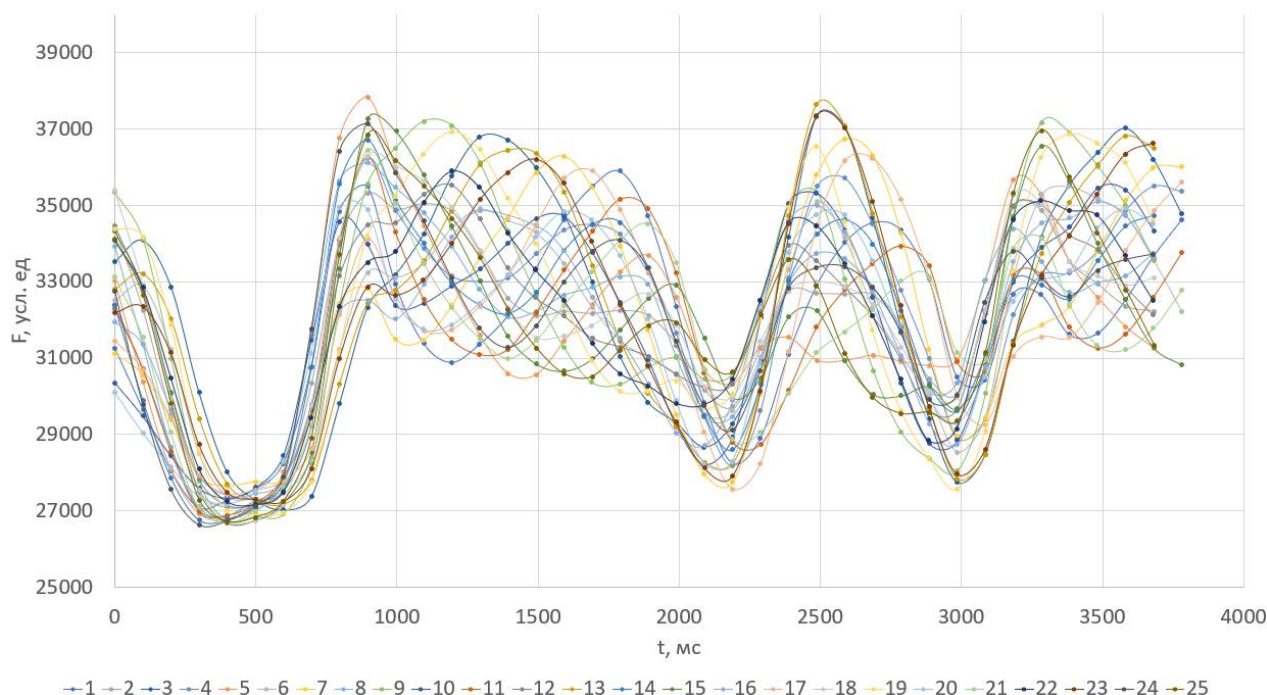


Рис. 13. Исходные данные 25-ти оборотов по часовой стрелке с частотой съема данных 10 Гц

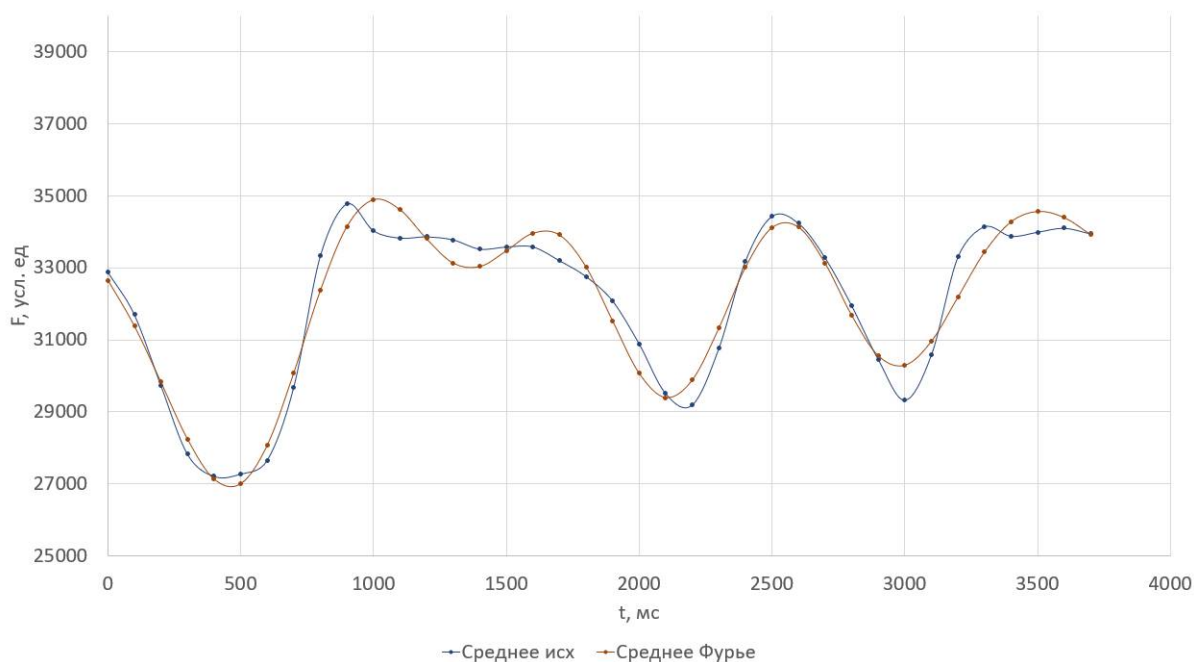


Рис. 14. Среднее исходных данных и отфильтрованных данных 25-ти оборотов по часовой стрелке с частотой съема данных 10 Гц

- для дальнейших экспериментальных исследований усилий, возникающих в пластинах приводной роликовой однорядной цепи конвейеров для паллет рекомендуется использовать частоты 12,5 Гц и 16,7 Гц;
- для анализа серии замеров усилий, возникающих в пластинах приводной роликовой

цепи конвейеров для паллет с частотой съема данных 12,5 Гц или 16,7 Гц рекомендуется использовать фильтр на участках зацепления цепи и звездочек, а на участках движения цепи между звездочками рекомендуется использовать усредненные исходные данные.

Список литературы

1. Носко А.Л., Сафронов Е.В., Потапов В.А. Система паллетных модулей для складской интралогистики // Вестник машиностроения. 2016. № 8. С. 10-12.
2. Носко А.Л., Сафронов Е.В. Преимущества использования типовых паллетных интралогистических решений при проектировании и эксплуатации складов // Логистика. 2016. № 5(114). С. 16-21.
3. Цепи приводные роликовые и втулочные. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2000. 22 с.
4. Мевша Н.В., Пунтус А.В. Оборудование для исследования динамики цепных передач // Приводы и компоненты машин. 2019. № 1-2. С. 17-19.
5. Мевша Н.В. Методы исследования и оценки технического состояния цепных передач: Дисс. ... канд. техн. наук. Краснодар, 2005. 213 с.
6. Ивановский К.Е., Раковщик А.Н., Цоглин А.Н. Роликовые и дисковые конвейеры и устройства. М.: Машиностроение, 1973. 216 с.
7. Иванченко Ф.К. Расчеты грузоподъемных и транспортирующих машин. Киев: Вища школа, 1978. 576 с.
8. Кузьмин А.В., Марон Ф.Л. Справочник по расчетам механизмов подъемно-транспортных машин. Минск: Вышэйшая школа, 1983. 350 с.
9. Спиваковский А.О., Дьячков В.К. Транспортирующие машины. М.: Машиностроение, 1983. 487 с.
10. Зенков Р.Л., Ивашков И.И., Колобов Л.Н. Машины непрерывного транспорта. М.: Машиностроение, 1987. 432 с.
11. Ерохин М.Н., Карп А.В. Проектирование и расчет подъемно-транспортных машин сельскохозяйственного назначения. М.: Колос, 1999. 228 с.
12. Ромакин Н.Е. Машины непрерывного транспорта. М.: Издательский центр "Академия", 2008. 432 с.
13. Мерданов Ш.М., Смолин Н.И., Иванов А.А., Шефер В.В. Машины непрерывного транспорта. Тюмень: ТюмГНГУ, 2010. 208 с.
14. Матвеев В.И., Смоляр А.П. Ма-

References

1. Nosko A.L., Safronov E.V., Potapov V.A. Pallet module system for warehouse logistics. *Vestnik mashinostroeniya*, 2016, No. 8, pp. 10-12. (In Russian)
2. Nosko A.L., Safronov E.V. Advantages of using standard flight intralogistic solutions in the design and operation of warehouses. *Logistika*, 2016, No. 5(114), pp. 16-21. (In Russian)
3. Roller and roller drive chains. General technical conditions. Moscow, Izdatelstvo standartov, 2000. 22 p.
4. Mevsha N.V., Puntus A.V. Equipment for studying the dynamics of chain gears. *Privody i komponenty mashin*, 2019, No. 1-2, pp. 17-19. (In Russian)
5. Mevsha N.V. Metody issledovaniya i ochenki texniche-skogo sostoyaniya tsepnykh peredach. Diss. Cand. Sci. (Engineering). Krasnodar. 2005. 213 p. (In Russian)
6. Ivanovskiy K.E., Rakovshchik A.N., Tsoglin A.N. Roller and disc controllers and devices. Moscow, Mashinostroenie, 1973. 216 p. (In Russian)
7. Ivanchenko F.K. Calculations of cargo-carrying and transporting machines. Kiev, Vishha shkola, 1978. 576 p. (In Russian)
8. Kuzmin A.V., Maron F.L. Handbook on calculations of lifting and transport machinery. Minsk, Vishha shkola, 1983. 350 p. (In Russian)
9. Spivakovskiy A.O., Dyachkov V.K. Transporting machines. Moscow, Mashinostroenie, 1983. 487 p. (In Russian)
10. Zenkov R.L., Ivashkov I.I., Kolobov L.N. Continuous transport machines. Moscow, Mashinostroenie, 1987. 432 p. (In Russian)
11. Erokhin M.N., Karp A.V. Design and calculation of agricultural lifting and transporting machines. Moscow, Kolos, 1999. 228 p. (In Russian)
12. Romakin N.E. Continuous transport machines. Moscow: Izdatelskiy tsentr "Akademiya", 2008. 432 p. (In Russian)
13. Merdanov Sh.M., Smolin N.I., Ivanov A.A., Schafer V.V. Continuous transport machines. Tyumen, TyumGNGU, 2010. 208 p. (In Russian)
14. Matveenko V.I., Smolyar A.P. Con-

шины непрерывного транспорта. Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2021. 368 с.

15. Букеткин Б.В., Горбатовский А.А., Кисенко И.Д., Котов А.И., Лазаренко Э.С., Семенов-Ежов. Экспериментальная механика / под ред. Р. К. Вафина, О.С. Нарайкина. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 136 с.

16. Тензометрический метод измерения деформаций: учебное пособие / Под ред. В.А. Мехеда. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. 56 с.

17. Мевша Н.В., Макаров Р.В. Тензометрический датчик силы в ветвях роликовой цепи // Сб. тр. Международной научно-практической конференции "Механика, оборудование, материалы и технологии". Краснодар: КубГТУ, 2022. С. 110-116.

18. Мевша Н.В., Пунтус А.В. Обработка осциллограмм нагрузок, действующих в роликовых цепных передачах // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2016. №24. С. 38-40.

19. Субботина А.В., Гржибовский А.М. Описательная статистика и проверка нормальности распределения количественных данных // Экология человека. 2014. №2. С. 51-57.

††† tinuous transport vehicles. Mogilev, Belorus.-Ros. un-t, 2021. 368 p. (In Russian)

† 15. Buketkin B.V., Gorbatovsky A.A., Kis-
† enko I.D., Kotov A.I., Lazarenko E.S., Se-
† menov-Yezhov. Experimental mechanics.
† Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2004. 136 p. (In Russian)

‡ 16. Strain gauge method for measuring de-
‡ formations. Samara, Izd-vo Samar. gos. aero-
‡ kosm. un-ta, 2011. 56 p. (In Russian)

17. Mevsha N.V., Makarov R.V. Tensometric force sensor in roller chain branches. In: *Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Mexanika, oborudovanie, materialy i texnologii"*. Krasnodar, KubSTU, 2022. pp. 110-116. (In Russian)

18. Mevsha N.V., Puntus A.V. Processing of oscillograms of loads operating in roller chain gears. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii*, 2016, No.24, pp. 38-40. (In Russian)

‡ 19. Subbotina A.V., Grzhibovsky A.M.
‡ Descriptive statistics and verification of the
‡ normality of the distribution of quantitative
‡ data. *Ekologiya cheloveka*, 2014, No. 2, pp.
‡ 51-57. (In Russian)

УДК (UDK) 553.061: 553.41: 553.493: 553.44 (575)

БЕЛЬТАУСКИЙ ГАББРО-ПЕРИДОТИТОВЫЙ МАССИВ (ЗАПАДНЫЙ ТЯНЬ-ШАНЬ, УЗБЕКИСТАН): ГЕОЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ, АКЦЕССОРНО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ И ГЕОХИМИЧЕСКАЯ СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ**GABBRO-PERIDOTITE MASSIF OF BELTAU (WESTERN TIEN-SHAN, UZBEKISTAN): GEOLOGICAL AND PETROGRAPHIC FEATURES, ACCESSORY-MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL SPECIALIZATION**Мамарозиков У.Д., Суюндикова Г.М.
Mamarozikov U.D., Suyundikoiva G.M.Институт геологии и геофизики имени Х.М. Абдуллаева при Университете геологических наук
(Ташкент, Узбекистан)Institute of Geology and Geophysics named after Kh.M. Abdullaev at the University of Geological Sciences
(Tashkent, Uzbekistan)

Аннотация. Изложены результаты исследования по изучению геологической позиции и внутреннего строения, петрографических и петрохимических особенностей Бельтауского габбро-перидотитового массива. Приведены оригинальные данные о видовом и вещественном составе породообразующих минералов. Сделан вывод о расслоенности массива, обусловленной кристаллизационно-гравитационной дифференциации первичной базальтовой магмы, продукты которой представлены отдельными горизонтами лерцолитов, троктолитов, оливиновых габбро, титанавгитовых габбро, габброноритов, габбропироксенитов и анортозитов. Она подтверждается внутренним строением интрузивного массива – анортозиты и безолиновые лейко- и мезократовые габброиды располагаются ближе к центральной части массива, гипсометрически выше, чем меланократовые габброиды и перидотиты, а последние тяготеют к периферическим и более глубоким его частям. Определены формы находений и вещественные составы главных минералов-концентраторов и минералы-носителей железа, титана, меди, никеля, кобальта, хрома, платиноидов, золота, серебра и других металлов. Геохимическая специализация перидотитов характеризуется ярко выраженными повышенными содержаниями никеля и кобальта, которые резко превышают содержания этих элементов, чем в мелано- и мезократовых габбро, лейкогаббро и анортиозитах. Меланократовые, мезократовые габброиды и их жильные дериваты являются относительно медоносными, чем остальные породы массива.

Ключевые слова: перидотиты, габброиды, минералы-концентраторы, минералы-носители, геохимическая специализация, медно-никелевое оруденение.

Дата получения статьи: 29.05.2025
Дата принятия к публикации: 13.07.2025
Дата публикации: 25.09.2025

Abstract. The results of a study on the geological position and internal structure, petrographic and petrochemical features of the Beltau gabbro-peridotite massif are presented. Original data on the species and material composition of rock-forming minerals are presented. It is concluded that the massif is stratified due to crystallization-gravitational differentiation of primary basaltic magma, the products of which are represented by separate horizons of lherzolites, troctolites, olivine gabbro, titanavgitite gabbro, gabbronorite, gabbropyroxenite, and anorthosite. It is confirmed by the internal structure of the intrusive massif - anorthosites and beolin-free leucocratic and mesocratic gabbroids are located closer to the central part of the massif, hypsometrically higher than melanocratic gabbroids and peridotites, and the latter gravitate to its peripheral and deeper parts. The forms of occurrence and material compositions of the main concentrating minerals and carrier minerals of iron, titanium, copper, nickel, cobalt, chromium, platinum, gold, silver, and other metals are determined. The geochemical specialization of peridotites is characterized by pronounced elevated contents of nickel and cobalt, which sharply exceed the contents of these elements than in melano- and mesocratic gabbro, leukogabbro and anorthosites. Melanocratic, mesocratic gabbroids and their vein derivatives are relatively melliferous than other rocks of the massive

Keywords: peridotites, gabbroids minerals-concentrators, minerals-carriers, geochemical specialization, copper-nickel mineralization.

Date of manuscript reception: 29.05.2025
Date of acceptance for publication: 13.07.2025
Date of publication: 25.09.2025

Сведения об авторах:

Мамарозиков Усмонжон Довронович – доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры «Общая геология» Университета геологических наук (УГН), главный научный сотрудник лаборатории «Изучение рудообразующих процессов» Института геологии и геофизики имени Х.М.Абдуллева при УГН, Министерство горного дела и геологии Республики Узбекистан, e-mail: udmamarozikov@rambler.ru.

Суюндикова Гулчехра Махкамбаевна – научный сотрудник отдела «Изучение рудообразующих процессов» Института геологии и геофизики имени Х.М.Абдуллева при УГН, Министерство горного дела и геологии Республики Узбекистан, e-mail: gsuyundikova@rambler.ru.

Authors' information:

Usmonjon D. Mamarozikov – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor of the Department of “General Geology” at the University of Geological Sciences (UGS), chief researcher of the laboratory of study of ore-forming processes at the Institute of Geology and Geophysics named after Kh.M. Abdullayev at UGS, Ministry of Mining Industry and Geology of the Republic of Uzbekistan, e-mail: udmamarozikov@rambler.ru.

Gulchekhra M. Suyundikova – Researcher of the Laboratory of study of ore-forming processes at the Institute of Geology and Geophysics named after H.M. Abdullayev at UGS, Ministry of Mining Industry and Geology of the Republic of Uzbekistan, e-mail: gsuyundikova@rambler.ru.

1. Введение

В последние годы в мире вновь проявился интерес к освоению промышленных сульфидных медно-никелевых руд, связанных с гипербазит-базитовыми интрузивными массивами – продуктами мантийного магматизма. Вполне понятно, что реализация этого интереса в практике геолого-поисковых и геологоразведочных работ невозможна без надлежащего уровня общей геологической изученности интрузивного гипербазит-базитового магматизма. На базит-гипербазитовые формации приходится существенная рудная нагрузка по запасам Fe, Cr, Ti, Ni, Co, Cu и ЭПГ [1-20]. Поэтому изучение их на предмет расширения и пополнения минерально-сырьевой базы является важным. Особенно это касается Бельтауского габбро-перидотитового массива, где размещено связанное с ним комплексное сульфидно-никелевое и графитовое месторождение Тазказган.

2. Геологическая позиция Бельтауского габбро-перидотитового массива

Бельтауский габбро-перидотитовый массив расположен в юго-западной части Центрально-Кызылкумского рудно-магматического концентратора, западной оконечности хребта Кульджуктау (Западный Узбекистан). Массив находится среди доломитизированных, мраморизованных известняков, доломитов и кремнисто-карбонатных пород верхнего силура и среднего девона (дженгельдинская свита - S_2dz , башгужумдинская

свита - S_2bd , туркментауская свита - D_1tr , султанбибинская свита - D_2sb). Массив в соответствии с современной схемой стратиграфии и магматизма Кульджуктауского региона имеет двухфазное строение: первая фаза – перидотитовая (серпентинизированные плагиоклазсодержащие лерцолиты), вторая – габброидная (троктолиты, габбро-нориты, титанавгитовые и рогообоманковые габбро, лейкогаббро, анортозиты и их дериваты) (рис. 1).

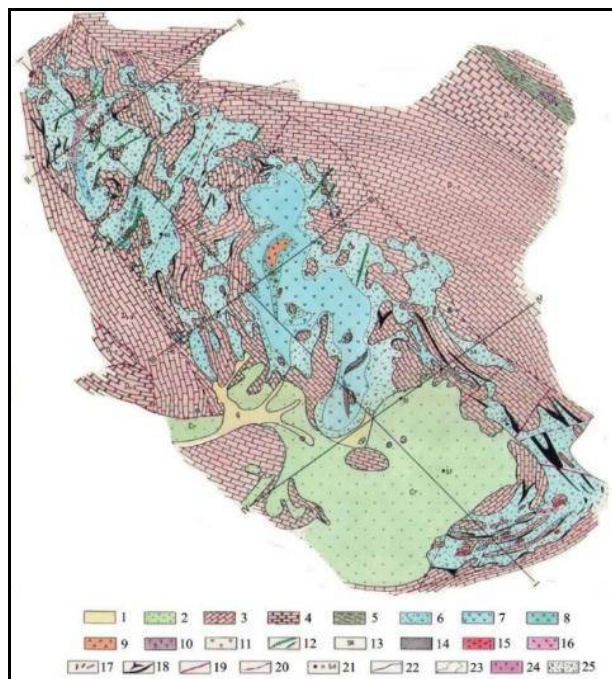


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Бельтауского габброидного массива (Составлена В.В. Барановым (1961) с дополнениями Г.Г. Лихойдова [20])

На рис. 1 обозначено: 1 – современные отложения Q; 2 – терригенно-осадочные отложения K; 3 – известняки D₁₋₂; 4 – доломиты и доломитизированные известняки D₁₋₂; 5 – метаморфизованные песчано-сланцевые отложения S_{2-D}; 6 – роговообманковое габбро; 7 – габбро с титан-авгитом; 8 – лейкократовое габбро; 9 – анортозит и полосчатое габбро; 10 – лерцолит и плагиолерцолит; 11 – пегматоидное габбро; 12 – микрогаббро; 13 – карбонатитовый альнеит; 14 – пироксен-гранат-волластонитовый скарн; 15 – гранитоиды; 16 – габбро-сиенит; 17 – кварцевые жилы; 18 – тела графита; тектонические нарушения: 19 – прослеженные, 20 – предполагаемые; 21 – места проходки скважин; 22 – интрузивные контакты; 23 – постепенные взаимопереходы габброидов; 24 – диорит и кварцевый диорит; 25 – габбро-норит и амфиболитизированный габбро-норит.

Бельтауский массив занимает ядро брахисинклинальной складки так, что северо-западная часть его прорывает доломиты и доломитизированные породы, а центральная и юго-восточная части преимущественно известняки. В плане массив представляет вытянутый в юго-восток – северо-западом направлении овал с соотношением осей 2 км: 6 км и занимает площадь 12 км².

Геофизическими методами (электропрофилирование) установлены крутое падение плоскости контакта под Бельтауский массив в его западных, юго-западных и северо-восточных частях. На востоке, юго-востоке и юге контакты массива имеют вертикальное падение со слабым уклоном под массив. По вертикали массив занимает 1600 м при максимальной мощности в центре массива. Внутренне строение массива осложнено многочисленными, часто крупными, ксенолитами вмещающих карбонатных пород (скиалитами). Они занимают значительную площадь современного среза и прослеживаются на глубину по данным структурного глубокого бурения. С глубиной площадь распространения скиалитов, по данным электроразведки уменьшается. Согласные условия залегания интрузива габброидов в известняках характерны для не-

большой части поверхностных выходов, в основном вблизи крупных скиалитов, подчеркивающих своим положением брахисинклинальную структуру [21-23].

Основываясь на наблюдениях О.М. Шиллера, М.Ш. Шарафиева, Л.Б. Когана, В.В. Баранова, Я.С. Висьневского, К.М. Кромской, и своих данных, И.Х. Хамрабаев и А.Ф. Свириденко [27] описывают массив как сложное межпластовое лополитообразное тело, сложенное породами двух комплексов.

Позднее Бельтауский массив был весьма детально изучен Ю.Ф. Баскаковым и Н.И. Крыловым [22], а также Г.Г. Лихайдовым [20]. По их данным он является лополитом, т.е. имеет форму ассиметричной воронки или чаши многоэтажной из-за обилия межпластовых тел перидотитов и габброидов. Последние внедрены в полости отслоения пологой мульды, сложенной известняками и доломитами. Судя по гравиметрическим данным, подошва лополита располагается на глубине не более 1,5-2,2 км.

Возраст массива определен как среднее из 2 замеров K-Ar методом по валовой пробе титанавгитового габбро, 295 млн. лет. По амфиболу и биотиту возраст интрузива определен в пределах 305-285 млн. лет [22, 24, 25].

Массив объединяет многочисленные разновидности габбро, имеющие постепенные взаимопереходы. Средне- и крупнозернистые мелано- и мезократовые оливиновые, титанавгитовые, роговообманковые габбро и габбронориты, лейкократовые габбро и анортозиты, характеризующие вторую фазу, составляют более 80 % объема массива, прорывающий тело гипербазитов (серпентинизированных лерцолитов) первой фазы. В нижних (вскрытых бурением) горизонтах среди преобладающих разновидностей выявлены участки троктолитов, сменяющиеся выше по разрезу отдельными прослоями крупнозернистых габброноритов, титанавгитовых, роговообманковых габбро и стратиформных анортозитов. Однако, этот факт объясняется своеобразным механизмом формирования интрузива, в котором после внедрения произошла дифференциация базальтоидной магмы на основную в апикальной части и

ультраосновную в придонной, с последующим выниманием последней в верхние уже раскристаллизовавшиеся части интрузива, имеющего здесь габброидный состав. В последние годы появилось представление о происхождении Бельтауского габбро-перидотитового массива как продукта «горячей точки» [26].

3. Петрохимические и петрографические особенности пород Бельтауского габбро-перидотитового массива

По химизму и петрохимическим особенностям породы Бельтауского габбро-перидотитового массива соответствуют нормальному магматическому ряду, характеризующему эволюции доорогенного мантийного магматизма (табл. 1). Они имеют закономерно повышающиеся содержания SiO_2 от гипербазитов к базитам и охватывают широкий спектр пород (перидотиты, троктолиты, габбро-нориты, титанавгитовые габбро, роговообманковое габбро, лейкогаббро, анортозиты и парагенетические связанные с ними базитовые дайки).

От перидотитов к габброидам постепенно повышается щелочность пород (значение $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ в перидотитах, 1,37-1,52 %, троктолитах 0,78 %; габбро-норитах 2,79 %; титанавгитовых габбро 2,58 %; роговообманковых габбро 3,79 %, лейкогаббро и анортозитах 0,83-2,99 %; габброидных дайках 3,09 %).

По петрохимическим коэффициентам они относятся к натриевым сериям (в перидотитах $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ – 2,0-3,0; в троктолитах $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ – 1,23; в норитах $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ – 10,86; в габбро-норитах $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ – 4,58, в титанавгитовых габбро – 1,35; в роговообманковых габбро 2,27; в анортозитах 4,98; в дайках основного состава – 2,64), низкоглиноземистых (в перидотитах al' – 0,23-0,46; в троктолитах al' – 0,28; в габбро-норитах al' 1,10; в титанавгитовых габбро al' – 1,30; роговообманковых габбро al' – 1,16; в лейкогаббро и анортозитах al' – 3,22-4,86; дайках основного состава al' – 1,19) магматических пород.

Значения коэффициентов магнезиальности пород гипербазит-базитового комплекса уменьшается от перидотитов к габброидам и дериватам последних (в перидотитах $\text{Mg}\#$ –

63-69; троктолитах $\text{Mg}\#$ – 65; габбро-норитах $\text{Mg}\#$ – 53; титанавгитовых габбро $\text{Mg}\#$ – 49; роговообманковых габбро $\text{Mg}\#$ – 48; лейкогаббро $\text{Mg}\#$ – 11; анортозитах $\text{Mg}\#$ – 47; базитовых дайках $\text{Mg}\#$ – 45).

Лерцолиты, плагиоклазсодержащие лерцолиты слагают в пределах массива пластообразные тела средних и мелких размеров. Наиболее крупное тело обнажается в северо-западной части массива. Средняя мощность его 45-50 м, длина по простираанию около 500 м. Характерны четкие контакты с вмещающими габброидами, но без зоны закалки.

Лерцолит – порода черного с зеленоватым оттенком цвета, с кумулятивной и петельчатой структурой и массивной текстурой. Составляет из моноклинного и ромбического пироксена (30-40 %), оливина (25-48 %), биотита и амфибола (8-15 %). В отдельных участках встречается келифитовая структура, которая образуется при появлении келифитовых кайм по границам оливина и плагиоклаза из тремолита или хлорита (рис. 2).

Второстепенные минералы амфибол, хлорит, серпентин, иддингсит и вторичные магнетиты, хромсодержащие магнетиты. Акцессорные: титаномagnetит, ильменит сульфидные минералы, апатит, циркон, сфен, графит.

Оливин кристаллизуется в виде субидiomорфных, иногда гипидiomорфных зерен, разбитых петельчатыми трещинками, заполненными серпентином с магнетитом. Плагиоклаз образует мелкие ксеноморфные агрегаты зерен, выполняющих интерстиции между кристаллами оливина и ромбического пироксена.

Среди продуктов изменения железистого оливина распространен иддингсит – красновато-коричневое или оранжевое кристаллическое вещество, содержащие вторичные магнетиты и хром-магнетиты. Иддингсит представляет собой смесь смектита (Mg -содержащего глинистого минерала из группы монтмориллионита), хлорита, серпенина и гетита. Последний минерал, вероятно, и определил яркую окраску иддингсита.

Таблица 1

Химический состав [по 27] и петрохимические коэффициенты пород Бельтауского габбро-перидотитового массива, в %

Компоненты, коэффициенты	1 (6)	2 (3)	3 (1)	4 (7)	8 (4)	9 (11)	10 (1)	11 (3)	12 (3)	13 (2)
SiO ₂	42,87	45,27	41,00	50,98	46,80	51,26	50,04	48,26	50,67	56,79
TiO ₂	0,51	0,72	сл.	1,11	0,86	1,21	1,04	0,33	1,14	1,06
AlO ₂	8,51	12,86	10,73	16,52	16,63	16,77	25,52	26,44	17,50	17,20
Fe ₂ O ₃	2,35	1,68	5,98	0,09	0,67	0,96	0,50	0,35	1,54	0,62
FeO	8,95	8,81	7,41	7,00	5,88	6,55	6,58	2,52	6,58	5,18
MnO	0,16	0,06	0,17	0,11	0,08	0,11	0,06	0,02	0,13	0,10
MgO	25,19	17,54	24,55	7,96	6,25	6,93	0,85	2,57	6,54	4,82
CaO	4,51	10,03	4,30	10,31	17,17	9,45	11,20	15,03	9,20	5,92
Na ₂ O	1,02	1,03	0,43	2,29	1,48	2,63	0,05	2,49	2,24	2,93
K ₂ O	0,50	0,34	0,35	0,50	1,10	1,16	0,78	0,50	0,85	2,10
P ₂ O ₅	0,07	0,15	н/о	0,10	0,19	0,21	0,09	0,06	0,13	0,09
H ₂ O-	0,53	н/о	0,88	0,25	0,20	0,26	1,02	0,10	0,51	0,43
H ₂ O+	3,55	1,39	3,92	0,27	0,00	1,99	н/о	0,61	2,70	2,25
CO ₂	0,47	н/о	н/о	0,27	0,69	0,41	н/о	0,46	0,39	0,41
SO ₃	0,02	н/о	н/о	0,09	0,01	0,01	н/о	0,03	н/о.	н/о
S	0,13	0,27	н/о	0,09	0,00	0,02	0,15	0,01	0,20	н/о
Сумма	99,34	100,15	99,72	98,94	98,01	99,93	97,88	99,78	100,32	99,9
Na ₂ O+K ₂ O	1,52	1,37	0,78	2,79	2,58	3,79	0,83	2,99	3,09	5,03
Na ₂ O/K ₂ O	2,04	3,03	1,23	4,58	1,35	2,27	0,06	4,98	2,64	1,40
al'	0,23	0,46	0,28	1,10	1,30	1,16	3,22	4,86	1,19	1,62
f'	37,16	28,81	38,11	16,27	13,74	15,76	9,03	5,79	15,93	11,78
Mg#	69,03	62,58	64,71	52,89	48,83	47,99	10,72	47,24	44,61	45,39
K _f	30,97	37,42	35,29	47,11	51,17	52,01	89,28	52,76	55,39	54,61

Примечание: 1 – лерцолит, 2 – плагиоклазсодержащий лерцолит, 3 – троктолит, 4 – габбро-норит, 5 - титанавгитовое габбро, 6 - роговообманковое габбро, 7 – лейкогаббро, 8 – анортозит, 9 – дайка микрогаббро, 10 – микроклинизированное роговообманковое габбро; цифры в скобках – количество анализов; н/о – не обнаружено. Mg# = $\text{MgO} \times 100 / (\text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})$ (магнезиальность), $K_f = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}) \times 100 / (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MgO})$ (железистость); $al' = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MgO})$ (глиноземистость), $f' = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO} + \text{MgO} + \text{TiO}_2)$ (фемичность).

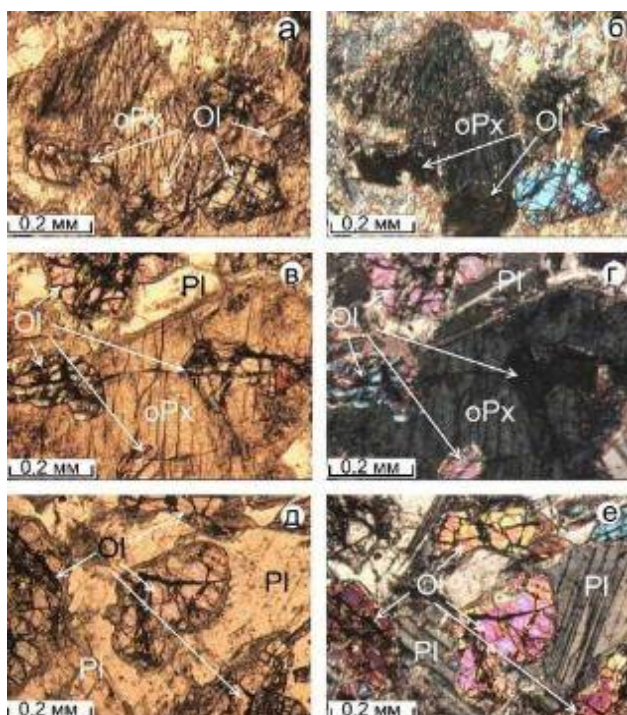


Рис. 2. Плагноклазсодержащий лерцолит.
Бельтауский массив. Шлиф №Бл-58,
а-, в-, д – николи параллельные,
б-, г-е – николи скрещены

а-г – фрагменты пойкилитовой структуры. Она характеризуется присутствием в относительно крупных кристаллах ромбического пироксена (oPx) незакономерно ориентированных, более мелких включений оливины (Ol). Пойкилитовые вростки часто корродированы и имеют округлую форму;

д-е – фрагменты келифитовой структуры, которая по своей природе является вторичной и келифитовые каймы по границам оливины (Ol) и плагноклаза (Pl) из тремолита и хлорита возникли после полной раскристаллизации породы вследствие реакционного взаимодействия минералов между собой в твердом состоянии в присутствии позднематматических растворов.

Первичные акцессорно-рудные минералы в породе чаще представлены редкими зернами ильменита и апатита. Магнетиты и хромсодержащие титанистые магнетиты являются продуктами разложения оливины, которые образуют своеобразные шнуровидные выростки в серпентиновой массе или формы «конского хвоста» в иддингсита. В некото-

рых зернах оливины отчетливо наблюдаются структуры распада в виде тонких ламелей магнетита, протянувшихся в определенном кристаллографическом направлении (вероятно, вдоль плоскости призмы) в пределах одного зерна.

Эндоконтактовые части крупных тел лерцолитов и мелкие тела, по составу, отвечают плагноклазсодержащим лерцолитам и содержат плагноклаз (до 10-15%). Структура породы панидиоморфнозернистая, местами пойкилитовая. Мелкие тела обычно не сопровождаются изменениями во вмещающих габброидах. Крупные же тела вызывают перекристаллизацию вплоть до образований крупноблочных пегматоидов.

Троктолиты отмечаются лишь в кернах. Порода состоит из плагноклаза (до 40%) и оливины (до 60%), в числе прочих отмечаются клинопироксен биотит, пренит, серицит, хлорит, серпентинит, рудные минералы (рис. 3).

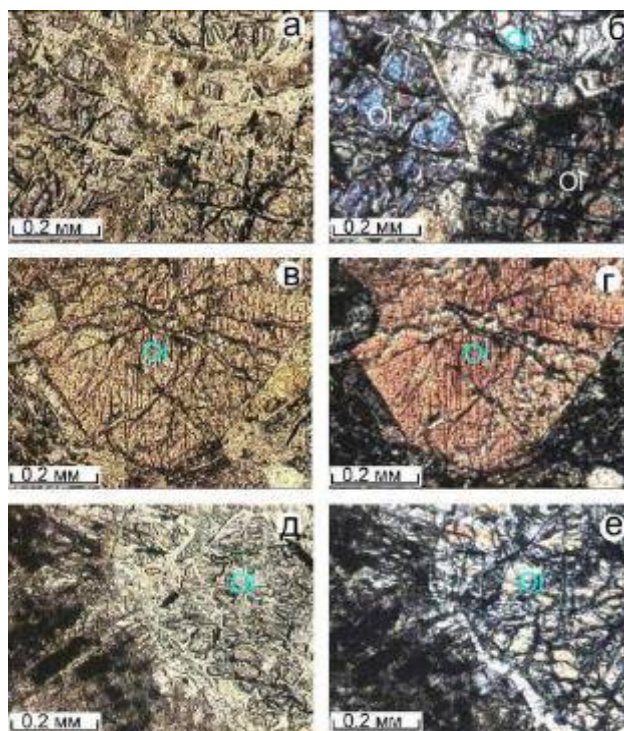


Рис. 3. Серпентинизированный троктолит.
Шлиф № Бл-57, а-, в- и д – николи параллельные, б-, г- и е – николи скрещены

а-б- реликт крупных панидиоморфных зерен оливины, замещенных серпентином и вторичным магнетитом; в-г – зерна оливины

в соссюритовой массе; д-е – взаимоотношение соссюритизированного плагиоклаза с серпентинизированным оливином. По краю последнего развита килобитовая кайма, состоящая из тремолита и хлорита.

Оливиновое габбро – порода темно-серая с зеленоватым оттенком, среднезернистая, структура офитовая (рис.4, а-б и д-е) с элементами пойкилитовой (рис. 4, в-г). Структура породы офитовая (а-б и д-е) с элементами пойкилитовой (в-г). Зерна основного плагиоклаза (Pl) идиоморфны по отношению к клинопироксену (Px) и оливину (Ol). Кристаллы оливина в некоторых случаях содержат раскристаллизованные включения рудогенерирующего флюида. В пироксене отмечаются пойкилитовые включения плагиоклаза (в-г).

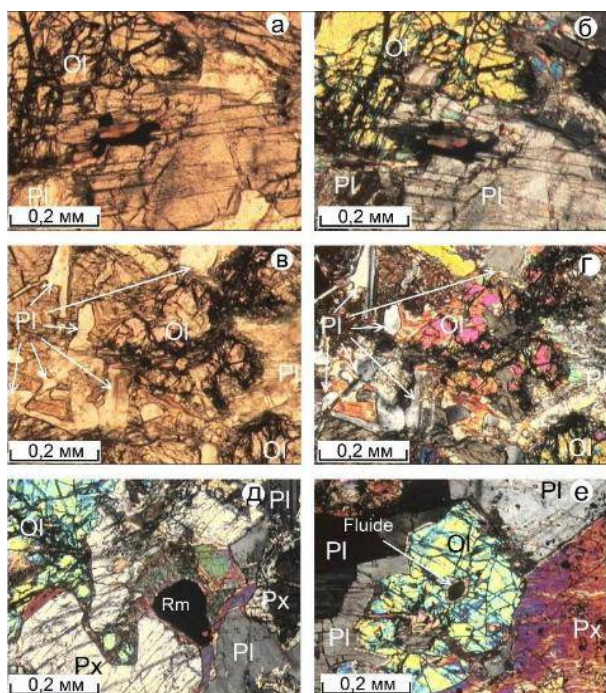


Рис. 4. Оливиновое габбро. Шлиф № Бл-40, а и в – николи параллельные, остальные – николи скрещены

Центральная часть Бельтауского массива сложена **титанавгитовыми габбро**. Кроме того, в виде небольших линзообразных тел встречается повсеместно. Эта порода от светлого до темно-серого цвета с характерным сиреневым оттенком. Состоит из титанавгита (34-37%), плагиоклаза (50-54%),

амфибола (8-10%), биотита (0,12%), кальцита (0-2%) и сфена (0-5%). Размер зерен 0,5-1,2 мм (рис. 5).

Порода в основном сложена удлиненными таблитчатыми, призматическими зернами основного плагиоклаза (Pl) и клинопироксена – титанавгита (Px). Второстепенные породообразующие минералы представлены бесформенными решетчатыми кристаллами роговой обманки (Amf), чешуйками биотита (Bt), рудными минералами (Rm) – ильменитом, сфеном и сульфидами. Вторичные минералы – соссюрит по плагиоклазу, мусковит по биотиту. Плагиоклаз идиоморфен по отношению к титанавгиту, кроме того, его пойкилитовые включения встречаются в последнем.

Размеры зерен титанавгита – сотые доли миллиметра, 2-2,5 мм. Характерен сиреневый цвет, по которому он легко узнается в породах. Под микроскопом имеет различную интенсивность окраски в сиреневых и розовых тонах, иногда со слабым плеохроизмом по прямой схеме, угол погасания $C:N_g = 48-50^\circ$. Образует ксеноморфные, изредка короткостолбчатые кристаллы (рис. 5 и 6). Характерна уралитизация – замещение титанавгита волокнистой зеленой роговой обманкой.

В пределах Бельтауского массива выделяются также и тела **габбро-норитов** (рис. 6). Они состоят из плагиоклаза (55-69%), бронзита (8-19%), клинопироксена (до 21%), амфибола (0-10%), биотита (2-6%). Акцессорные минералы: апатит, ильменит, сфен, циркон.

Для тел габбро-норитов типичен линзообразный характер. Обращает на себя внимание развитие габбро-норитов преимущественно в северо-западной части Бельтауского массива, вмещающими породами которой являются доломитизированные карбонатные породы.

Для богатых оливином пород Бельтауского массива (плагиоклазосодержащие лерцолиты, трактолиты и оливиновые габбро) не вызывает сомнения интертеллурическая природа кристаллов оливина.

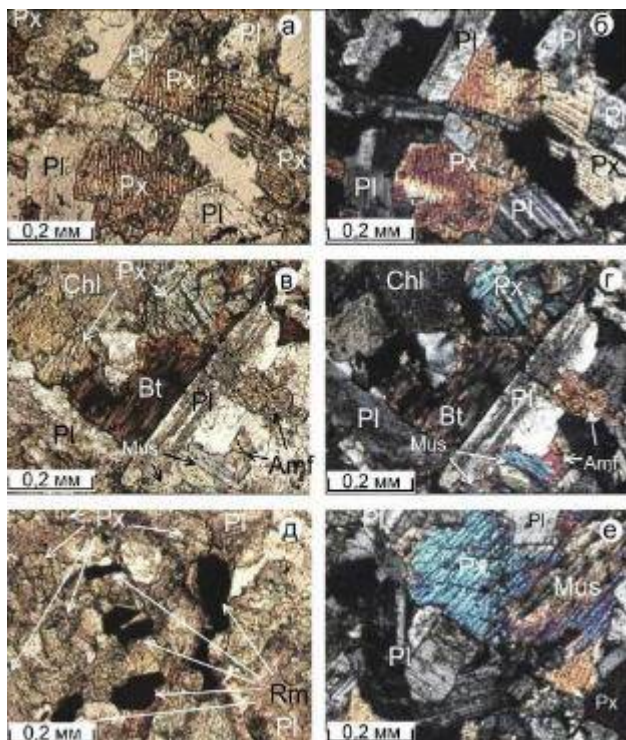


Рис. 5. Мелкозернистое титанавгитовое габбро. Шлиф № Бл-42, а, в и д – николи параллельные, остальные – николи скрещены

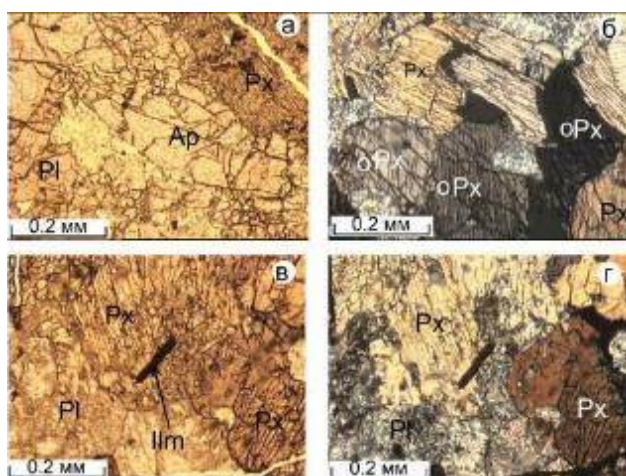


Рис. 6. Апатитоносный габбро-норит. Шлиф № БЛ-26, а-в – николи параллельные, б-г – николи скрещены

а - относительно крупный кристалл апатита в плагиоклаз-пироксеновой матрице породы; б - шпир, состоящий из ортопироксена (oPx) и клинопироксена (cPx) в габбро-норите; в-г - взаимоотношение сосюритизированного плагиоклаза с пироксеном, содержащим игольчатый ильменит.

Считается, что оливин кристаллизовался в глубинном очаге и в дальнейшем гравита-

ционно накапливался в их придонной части или придонной части магматической камеры, формируя слои перидотитов (лерцолитов). По составу оливин из плагиолерцолитов не отличается от оливинов из габброидов, в основном представлен хризотилом ($Fo_{74}-Fo_{79}$). Для оливинов этих пород статистически значимые отличия в содержаниях отмечены только для Fe и Mg (табл. 2).

Железистость оливина из лерцолитов, троктолитов и оливиновых габбро изменяется от Fa_{21} до Fa_{26} . Наиболее железистые разновидности минерала определены в оливиновых габбро – Fa_{26} . Самые маложезистые оливины установлены в троктолитах – Fa_{21} , но они имеют максимальную никеленосность ($NiO - 0,17\%$) и содержат примеси кобальта ($CoO - 0,10\%$) и меди ($CuO - 0,02\%$). Содержание MnO в оливинах закономерно растет с увеличением магнезиальности минерала (%): $Fo_{74} - 0,24$; $Fo_{79} - 0,41$. Количество Cr_2O_3 в оливинах варьируют от $0,02\%$ в оливиновых габбро до $0,12\%$ в троктолитах, в лерцолитах – $0,04\%$. Для сравнения можно отметить, что в оливинах лерцолитов Северного Тамдытау значение его достигает до $0,23\%$ [9].

Пироксены являются главнейшими наиболее широко распространенными породообразующими фемическими минералами перидотитов и габброидов массива. Ромбические пироксены в породах массива характерны для лерцолитов, оливиновых габбро, габбро-норитов и жилных дериватов последних – диабазов. В большинстве случаев ромбические пироксены представлены или бронзитом или гиперстеном. Например, состав ромбического пироксена в плагиоклаз-содержащих лерцолитах отвечает бронзиту ($En_{77}Fs_{21}Wo_{12}$), тогда как в оливиновых габбро состав колеблется от бронзита ($En_{78}Fs_{20}Wo_{14}$) до гиперстена ($En_{55}Fs_{42}Wo_{13}$). Диабазы – жилные дериваты габброидов исследуемого массива помимо нормальных гиперстенов ($En_{56}Fs_{41}Wo_{13}$) содержат более магнезиальные гиперстены ($En_{61}Fs_{35}Wo_{14}$). Хотя ромбические пироксены представляют собой в основном метасиликаты магния и железа, в них присутствуют ионы Al, Ca, Ti, Mn, V, Cr и Ni. В бронзитах и гиперстенах

пород массива суммарное количество их не превышает 5%.

Гиперстены характеризуются относительно большими содержаниями марганца (MnO – 0,39-0,75%), ванадия (V_2O_3 – до 0,07%), никеля (NiO – до 0,08%) и кальция (CaO – 1,45-1,83%), чем в бронзитах (MnO – 0,22-0,25%; V_2O_3 до 0,03%; NiO – до 0,02%;

CaO – 0,93-0,98%). В составе бронзита наблюдается увеличение содержаний титана (TiO_2 – 0,34-0,49). В бронзитах количество примеси хрома колеблется от 0,01% до 0,16%, в гиперстенах – от 0,06% до 0,12%. Гиперстены диабазов содержат примеси кобальта (CoO – 0,13%).

Таблица 2

**Результаты микрозондовых анализов оливинов и пироксенов пород
Бельтауского габбро-перидотитового массива, %**

Название и номер породы	n	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO^*	MnO	V_2O_3	Cr_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	NiO	CoO	Всего
Оливин															
Серпентинизир. лерцолит, БЛ-58	4	37,53	0,03	1,26	22,77	0,18	0,04	0,04	38,14	0,04	0	0	0	0	100,03
Серпентинизир. троктолит, БЛ-57	4	37,42	0,08	0,21	19,28	0,41	0,02	0,12	41,41	0,13	0	0	0,17	0,10	99,35
Оливиновое габбро, БЛ-40	2	37,05	0,03	1,41	23,84	0,24	0,015	0,02	37,40	0,01	0	0	0,05	0	100,02
Бронзит и гиперстен															
Серпентинизир. лерцолит, БЛ-58	6	54,44	0,34	1,88	13,66	0,22	0,01	0,01	28,37	0,98	0	0	0,02	0	99,93
Оливиновое габбро, БЛ-40	6	54,13	0,49	2,19	12,83	0,25	0,03	0,16	28,32	0,93	0	0	0,015	0	99,34
Тi-авгитовое габбро, БЛ-43	3	49,56	0,36	0,58	26,08	0,54	0,01	0,08	20,94	1,83	0	0	0,02	0	100
	1	49,17	0,29	0,18	28,64	0,75	0,01	0,06	19,34	1,54	0	0,02	0	0	100
Диабаз, БЛ-49	10	51,90	0,26	2,04	20,45	0,40	0,07	0,11	20,28	1,81	0	0	0,08	0	97,40
Диабаз, БЛ-36	6	50,39	0,25	1,75	24,82	0,39	0,06	0,12	19,34	1,45	0	0	0,05	0,13	98,75
Диопсид и магнезиальный салит															
Серпентинизир. троктолит, БЛ-57	1	51,38	0,85	2,73	4,32	0,07	0,09	0,37	16,80	23,22	0	0,06	0,11	0	100
Оливиновое габбро, БЛ-42	1	49,25	0,18	1,96	10,31	0,34	0,20	0,19	12,29	20,26	0,13	0,04	0	0	95,17
	1	51,74	0,06	1,47	10,55	0,28	0,13	0,15	13,24	22,28	0	0	0	0	99,90
Тi-авгитовое габбро, БЛ-43	1	49,92	0,16	0,08	11,03	0,24	0	0,16	14,27	23,24	0	0,12	0,04	0,03	99,82
Габбро, БЛ-54	2	53,68	0,08	1,65	7,78	0,13	0,10	0,20	14,24	22,69	0	0,01	0	0	100,56
Габбро-пироксенит, БЛ-30	3	51,67	0,45	1,88	5,38	0,08	0	0,99	15,31	23,84	0	0,13	0,01	0	100,31
Авгит, Тi-авгит и их субкальциевые разновидности															
Оливиновое габбро, БЛ-40	1	52,87	0,66	3,26	5,24	0,17	0,11	0,16	17,07	20,05	0,35	0	0,05	0	99,99
Оливиновое габбро, БЛ-42	1	48,66	0,78	4,56	14,46	0,20	0,03	0,30	13,80	10,50	0	0,29	0	0	93,58
	6	52,76	0,66	4,96	15,14	0,20	0,09	0,11	14,94	11,44	0,02	0,26	0	0	100,58
Тi-авгитовое габбро, БЛ-43	1	52,08	0,14	1,66	10,22	0,13	0	0,19	19,74	11,86	0	0,14	0,03	0	96,19
	4	44,35	2,90	8,70	16,16	0,13	0,18	0,21	12,89	12,24	0,20	0,97	0,03	0	98,96
Габбро-норит, БЛ-26	7	45,50	1,69	7,87	9,17	0,09	0,05	0,26	9,61	25,49	0,08	0,11	0,02	0	99,94
Габбро, БЛ-54	3	54,21	0,30	4,75	9,30	0,16	0,09	0,19	16,67	13,23	0,12	0,09	0	0	99,11
Габбро-пироксенит, БЛ-30	5	54,61	0,05	1,73	8,55	0,15	0	0,69	18,73	14,07	0	0,14	0,01	0,08	98,81
	1	41,27	17,60	3,02	5,53	0,09	0	1,14	9,57	21,56	0	0,19	0,02	0	99,99
Анортозит, БЛ-28	3	45,57	0,46	7,44	13,47	0,20	0	0,35	15,56	16,57	0	0,36	0	0	99,98
Анортозит, БЛ-29	7	53,12	0,51	4,32	11,11	0,12	0,11	0,20	16,21	12,33	0	0,08	0	0	98,11
	2	49,49	0,88	4,92	9,57	0,20	0,23	0,32	14,60	19,20	0	0,04	0	0	99,45
Диабаз, БЛ-36	3	49,62	0,57	3,46	15,13	0,18	0,08	0,24	14,57	10,96	0	0,25	0,03	0,10	95,19
	3	51,89	0,18	1,63	11,06	0,19	0,11	0,18	13,03	20,63	0,04	0,08	0	0,06	99,08
Диабаз, БЛ-49	2	51,80	0,48	2,47	9,53	0,27	0,19	0,20	13,81	21,28	0	0	0,07	0	100,10
	1	48,38	1,15	5,96	10,73	0,16	0,15	0,07	15,11	11,11	0	0,45	0,04	0	93,31

Примечание: здесь и далее в тексте и таблицах: $\text{FeO}^* = \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$; n – количества определений; содержания CO_2 и H_2O – не определены; микрозондовые анализы выполнены У.Д.Мамарозиковым на электронном микроанализаторе «Jeol-8800R» (Япония) в ИГиГ УГН.

Видовой состав моноклинного пироксена в породах массива широко варьирует от диопсида, магнезиального салита до титанавгита, авгита и их субкальциевой разновидности. В породах массива диопсиды и магнезиальные салиты определены только в троктолитах, оливиновых габбро и габбро-пироксенитах. Обычно в моноклинных пироксенах серии диопсида – магнезиального салита, встречающихся в перидотитах и меланократовых габброидах массива присутствует некоторое количество ионов, замещающих Ca, Mg и Fe. Содержания примесей титана и хрома в диопсидах значительно больше (TiO_2 – 0,45-0,85%; Cr_2O_3 0,37-0,99%), чем в магнезиальных салитах (TiO_2 – 0,06-0,18%; Cr_2O_3 – 0,15-0,20%). Последние содержат относительно преимущественные количества марганца – MnO – 0,24-0,34 %, а диопсиды – MnO – 0,07-0,08%. Кроме того, незначительные содержания примеси никеля установлены в диопсидах троктолита (NiO – 0,11%) и оливиновых габбро (NiO – 0,04%).

Проведенные нами микронзондовые исследования и интерпретация их результатов с помощью классификации [30] показывают, что основная масса моноклинных пироксенов в габброидах массива является членом титанавгит – субкальциевый титанавгит – авгитовой серии. Первые две из них составляют 30 % от общей массы минералов серии. Уменьшение содержания титана в поздних авгитах и субкальциевых авгитах мы связываем с фракционированием титана во время кристаллизации ильменита. Титанавгит и его субкальциевая разновидность характерны мелано- и мезократовым габброидам массива – оливиновым, титанавгитовым габбро, габбро-норитам и габбро-пироксенитам. Содержание окиси титана в этих минералах колеблется от 1,5 % до 2,90 %, редко в субкальциевых титанавгитах достигает до 17 %. Общими химическими особенностями всех моноклинных пироксенов из изученных габброидов является их средняя и высокая магнезиальность

$\#Mg = MgO \cdot 100\% / (MgO + FeO^*)$. Следует отметить, что значения $\#Mg$ находятся в пределах 44-81%. При этом максимальные количества описываемого параметра установ-

лены для субкальциевых авгитов ($\#Mg=76,5$) из оливинового габбро и субкальциевых титанавгитов ($\#Mg=81$) из титанавгитовых габбро.

Характерной чертой для моноклинных пироксенов титанавгит – субкальциевый титанавгит – авгитовой серии из габброидов массива является постоянное содержание примеси трехоксида хрома: в оливиновом габбро Cr_2O_3 – 0,11-0,30%; в титанавгитовом габбро Cr_2O_3 – 0,05-0,21%; в габбро-норите Cr_2O_3 – 0,26%; в габбро-пироксените Cr_2O_3 – 0,69-0,32%; в анортозите Cr_2O_3 – 0,20-0,32%.

Амфиболовое (роговообманковое) габбро слагает целиком северо-западную и юго-восточную части массива, а также окаймляет участки титанавгитового габбро, по контакту последнего, с известняками. Для этой породы характерна еще более высокая степень неравномерности распределения слагающих компонентов, структуры и состава, чем для титанавгитовых габбро. Однако многочисленные взаимопереходы не позволяют в поле различить эти породы, колебания составов иногда совершаются в пределах нескольких десятков и первых см, слагающие минералы всех этих пород, в сущности, одни и те же или образуются путем взаимных переходов и поэтому правильнее описать эту разновидность как одну породу. Она имеет серовато-зеленый цвет и состоит из плагиоклаза (55-65%), амфибола (15-25%), клинопироксена (5-20%), биотита (2-6, редко 8%). Из второстепенных минералов иногда отмечается кварц (до 0-7%), сфен (0-3%), кальцит (0-5%) и такие минералы как пренит, хлорит, серицит, лейкоксен, цеолиты, изредка тальк. Размер минеральных компонентов 0,3-1,5 мм (рис. 7). Акцессорные: апатит, ильменит, циркон, графит, рутил, сульфидные минералы, гранат, титаномagnetит.

Структура породы в основном офитовая, менее характерны габброофитовая, пойкилитовая и, еще реже, габбровая (рис. 7).

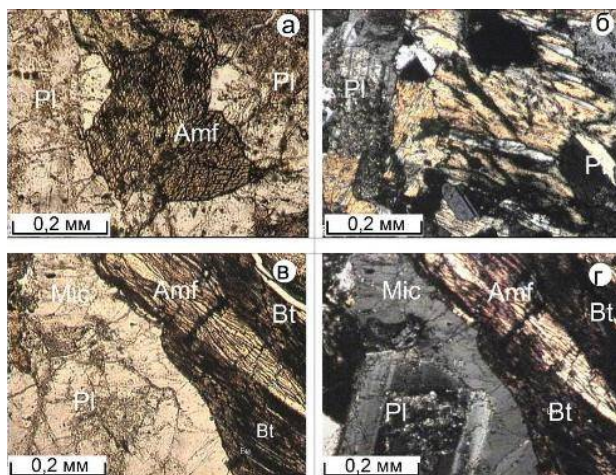


Рис. 7. Среднезернистое роговообманковое габбро. Шлиф № Бл-31, а-в – николи параллельные, б-г – николи скрещены

В оливиновом габбро амфиболы представлены гипидиоморфными зернами, выделившимися после пироксена. Они являются более ранними по отношению к плагиоклазам и флогопитам (биотитам). По составу это умеренноглиноземистый, высокотитанистый тип роговой обманки (табл. 3) – высокотитанистый чермакит, обогащенный магнием ($\#Mg - 67-73$) и щелочами (в %, $Na_2O - 1,47-2,42$; $K_2O - 0,49-0,96$; $Na_2O+K_2O - 1,96-3,38$). Содержание TiO_2 колеблется в основном от 3,82% до 5,42%, достигая значений характерных для керсутитов, но он от последних отличается углом погасания (в керсутите $C: Ng$ до 18° , в высоктитнистом чермаките $C: Ng$ до 30°).

Второй, наиболее богатый глиноземом ($Al_2O_3 - 18,45\%$) и железом ($FeO - 7,60\%$), но бедный титаном ($TiO_2 - 0,00n\%$), магнием ($MgO - 0,58\%$) и кремнеземом ($SiO_2 - 33,92\%$) тип роговой обманки – феррочермакит характерен для титанавгитовых габбро массива. Кроме того, он характеризуется невысоким содержанием Na_2O (0,44%) и K_2O (0,75%).

Слюды в лерцолитах, меланократовых и мезократовых габброидах массива представлены флогопитом, биотитом и мусковитом, где они замещают пироксены и амфиболы.

Флогопит является основным членом группы минералов слюд в лерцолите, троктолите, оливиновом габбро и титанавгитовом габбро Бельтауского массива. Флогопиты

этих пород отличаются по составу – из титанавгитового габбро характеризуется относительно высокой магнезиальностью ($\#Mg - 87$), чем в троктолите ($\#Mg - 73-74$), оливиновом габбро ($\#Mg - 71$), лерцолите ($\#Mg - 67$). Наблюдается также закономерное повышение содержания титана во флогопитах от титанавгитового габбро ($TiO_2 - 1,41\%$) к оливиновому габбро ($TiO_2 - 2,30\%$), троктолиту (TiO_2 до 4,09 %) и лерцолиту ($TiO_2 - 6,33\%$). Флогопит титанавгитового габбро является более высокоглиноземистым ($Al_2O_3 - 17,68\%$). Биотиты встречается в габбро и его оливиновых, титанавгитовых разновидностях и диабазах массива. Им также, как и для флогопитов характерно высокое содержание титана, которое закономерно увеличивается от оливинового габбро ($TiO_2 - 2,34\%$) к таковым в титанавгитовом габбро ($TiO_2 - 5,29\%$) и диабазу ($TiO_2 - 4,25-4,38\%$). Биотиты этих пород отличаются повышенной железистостью ($\#Fe - 59-61$).

Количество примеси марганца и никеля от флогопита к биотитам уменьшается (во флогопите MnO – до 0,18 %, NiO – до 0,10 %; в биотите MnO – до 0,11 %, NiO – до 0,03 %), в последнем наоборот, ванадий и хром увеличиваются (в биотите V_2O_3 – до 0,26 %, Cr_2O_3 – до 0,42 %; во флогопите V_2O_3 – до 0,15 %, Cr_2O_3 – до 0,30 %).

Лейкократовое габбро и анортозиты известны в центральной части массива, где слагают возвышенные (гипсометрически), участки габброидов. Протягиваются в виде полосы на 300-350 метров при ширине 90-100 и по гребням водоразделов в центре массива.

Лейкократовое габбро в виде полосы отделяет анортозиты и пятнистые разновидности от титанавгитового габбро. Окружает в виде оторочки анортозиты и достигает по ширине 40-50 м. Порода имеет светло-серый цвет со слабым зеленоватым оттенком. Составляет из плагиоклаза (до 85%), пироксена (до 10%), амфибола (до 5%). Структура породы неоднородная, неравнозернистая, колеблется в пределах от средней до крупной зернистости и обычно габбровая, габбро-офитовая (рис. 8).

Таблица 3

**Результаты микрозондовых анализов амфиболов и слюд пород Бельтауского габбро-перидотитового массива
(месторождение Тасказган, Центральные Кызылкумы), %**

Название и номер породы	n	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	V ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅		NiO	CoO	Всего	Минерал
Минералы группы амфиболов																		
Оливиновое габбро, БЛ-40	1	43,50	4,42	11,52	7,40	0,09	0,11	0,14	15,48	11,20	2,01	0,63	0		0	0	96,50	Чермакит
	1	44,68	3,82	11,86	7,71	0,10	0,03	0	16,28	10,90	1,47	0,49	0		0	0	97,34	Чермакит
	1	43,16	5,42	11,15	7,43	0,00	0,23	0,39	15,46	11,16	2,42	0,96	0		0	0	97,78	Чермакит
	1	44,70	4,05	12,37	6,28	0,15	0,25	0,32	16,74	11,43	1,65	0,68	0		0	0	98,62	Чермакит
Тi-авгитовое габбро, БЛ-43	1	33,92	0	18,45	27,60	0,43	0	0,07	0,58	11,46	0,44	0,75	0,47		0	0	94,17	Феррочермакит
Анортозит, БЛ-28	1	35,79	0	24,61	20,05	0,24	0	0,48	15,19	3,03	0	0,48	0		0	0	99,87	Феррожедрит
Диабаз, БЛ-36	1	37,87	0,28	28,09	8,76	0,18	0,14	0	9,64	14,18	0	0,12	0,17		0,30	0,16	99,89	Чермакит
Минералы группы слюд																		
Серпентинизир. лерцолит, БЛ-58	1	37,21	6,33	14,64	10,83	0,18	0,15	0,30	21,72	0	0,83	5,83	0		0,04	0,08	98,14	Флогопит
Серпентинизир. троктолит, БЛ-57	1	34,57	4,09	13,95	7,25	0,09	0,01	0,08	20,00	1,09	0,74	7,71	0		0,14	0	89,72	Флогопит
	1	37,75	2,12	15,16	7,99	0	0	0	21,62	0	1,17	7,90	0		0	0	93,71	Флогопит
	2	34,65	0,47	13,21	7,10	0,08	0	0,08	21,23	0,13	0,77	6,63	0		0,02	0	84,37	Флогопит
Оливиновое габбро, БЛ-40	3	39,60	2,30	17,68	8,50	0,07	0,05	0,02	20,73	0,03	0,82	7,17	0		0	0	96,97	Флогопит
Оливиновое габбро, БЛ-42	3	33,68	2,34	16,50	22,50	0,09	0,07	0,38	14,11	0,70	0	5,19	0		0,02	0	95,58	Биотит
Тi-авгитовое габбро, БЛ-43	1	34,28	5,35	14,59	19,00	0,06	0,05	0,42	12,90	0,12	0	9,73	0		0	0	96,50	Биотит
Габбро-норит, БЛ-26	3	46,72	0,05	33,32	0,55	0,01	0	0,24	1,47	4,52	0,59	8,70	0		0	0	96,17	Мусковит
Габбро, БЛ-54	2	36,82	5,29	14,45	18,79	0,05	0,23	0,41	11,63	0,13	0	9,83	0		0	0	97,63	Биотит
Диабаз, БЛ-36	2	35,05	4,38	14,37	19,17	0,11	0,17	0,40	13,47	0,10	0	7,49	0		0,03	0,23	94,97	Биотит
Диабаз, БЛ-49	3	37,32	4,25	14,70	13,94	0,08	0,26	0,28	15,31	0,10	0	9,49	0		0,01	0	95,74	Биотит
	2	46,92	0	34,56	1,33	0,01	0	0	0	0,29	0	11,53	0		0	0	94,64	Мусковит

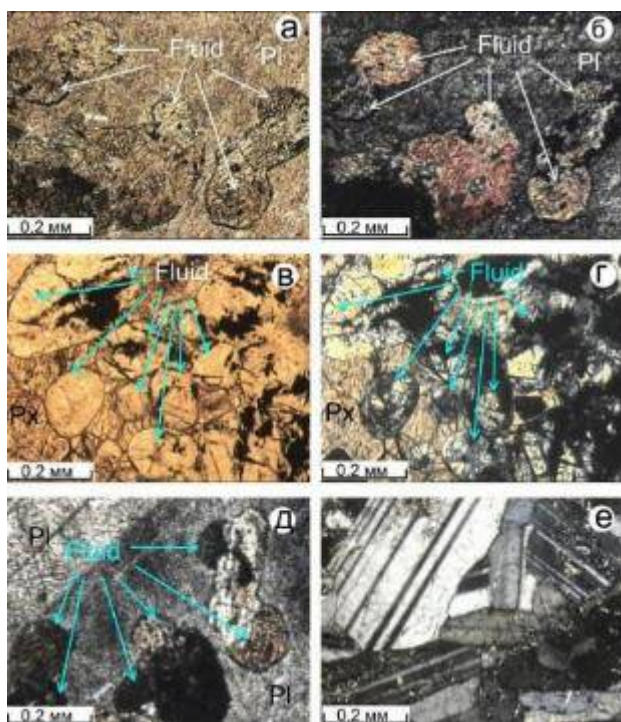


Рис. 8. Пятнистое лейкократовое габбро (габбро-анортозит). Шлиф БЛ-55, а-в – без анализатора, остальные - с анализатором

а-д - неоднородная структура пятнистой части породы, в которой главная роль принадлежит скоплениям шаровидных микробосложений кремне-карбонатного и кремнещелочного состава внутри сильно измененных лейств плагиоклаза и клинопироксена;

е – гипидиоморфнозернистая структура мономинеральной части габбро-анортозита, состоящая из гипидиоморфных призматических зерен основного плагиоклаза.

Все описанные выше разновидности пород характеризуются постепенными переходами друг в друга. Титанавгитовое габбро переходит в амфиболизированные и рогово-обманковые разновидности путем увеличения относительного количества амфибола за счет титанавгита, плагиоклаза, за счет темноцветных, и незначительного увеличения количества биотита, кварца, пренита, графита и ильменита. Лейкогаббро, с одной стороны, переходит к титанавгитовому путем увеличения значения темноцветных минералов, с другой к полосчатому габбро, что сопровождается появлением полосчатой текстуры.

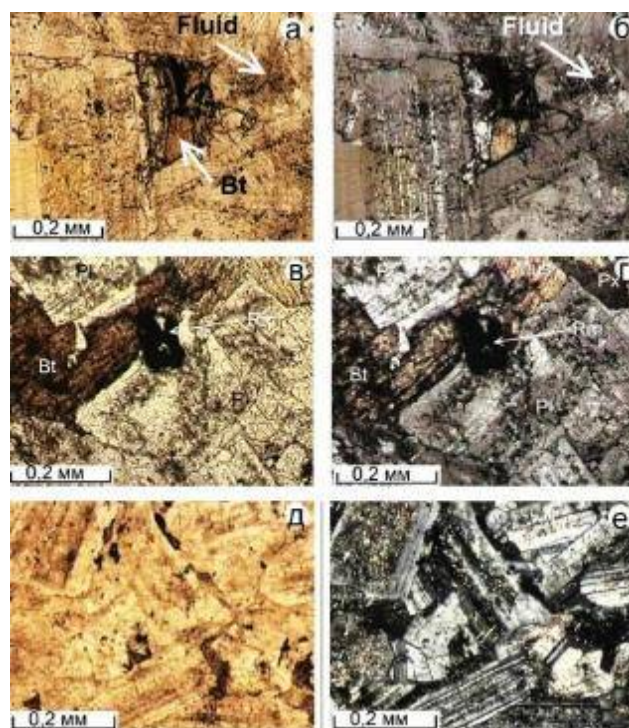


Рис. 9. Анортозит

а-г – взаимоотношение сосюритизированных лейстов плагиоклаза с флюидным микробосложением, чешуйкой биотита, с содержанием рудного минерала (шлиф №Бл-10);

в-г – на рисунках показан участок, обогащенный частично мусковитизированным биотитом, ассоциирующим с рудным минералом (шлиф №Бл-15);

д-е – хаотичное расположение призматических зерен плагиоклаза (шлиф №Бл-22); а-, в- и д – николи параллельные, остальные – николи скрещены.

Дериваты массива представлены диабазовыми дайками, развитые преимущественно в самом массиве, но изредка выходящие за его пределы. Мощность даек 1-3 м, протяженность от 5 до 500 м. Характерно преимущественное простирание подавляющего большинства даек от субмеридионального до северного – северо-восточного направления. Максимально развиты в северо-западной части габброидного массива, но отмечаются в его центральной части и в юго-восточной части. Характерно также преимущественное развитие даек в зоне контакта габброидов с вмещающими известняками.

В диабазе амфибол (чермакит) присутствует в небольшом количестве. Отличительной чертой его от высокотитанистого чермакита и феррочермакита является весьма высокая глиноземистость (Al_2O_3 – 28,09%), низкая щелочность ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ – 0,12%) и присутствие в нем примеси никеля (NiO – 0,30%) и кобальта (CoO – 0,16%).

Анализ химических составов плагиоклазов позволяет констатировать, что содержание в них анортитовой составляющей не опускается ниже 50 (табл. 4).

Это обусловлено максимальными содержаниями в описываемых минералах Al_2O_3 (29,55-31,88 %) и CaO (9,73-16,33 %) при минимальных количествах Na_2O (1,79-3,93 %). В анортозитах зерна плагиоклаза в основном соответствуют лабрадорам (An_{50}) и лабрадор-битовнитам (An_{65} - An_{70}), редко – битовнитам (An_{82}). В диабазовых дайках они представлены лабрадором (An_{64}) и битовнитом (An_{79}), по которым в результате более поздних изменений пород развита альбитовая кайма (An_5).

Таблица 4

Результаты микрозондовых анализов плагиоклазов пород Бельтауского габбро-перидотитового массива, %

Название и номер породы	n	SiO_2	Al_2O_3	FeO^*	MnO	CaO	Na_2O	K_2O	Всего	Миналы
Серпентинизированный троктолит, БЛ-57	2	62,45	22,09	2,24	0,52	6,11	6,29	0,28	99,98	$\text{An}_{36}\text{Ab}_{62}\text{Or}_2$
Оливиновое габбро, БЛ-40	1	52,65	30,02	0,25	0	12,89	3,98	0,10	99,89	$\text{An}_{64}\text{Ab}_{26}\text{Or}_0$
	2	55,20	27,86	0,12	0,06	10,49	5,34	0,04	99,11	$\text{An}_{52}\text{Ab}_{48}\text{Or}_0$
Оливиновое габбро, БЛ-42	2	56,57	27,40	0,22	0,03	9,84	5,60	0,17	99,83	$\text{An}_{49}\text{Ab}_{50}\text{Or}_1$
	1	60,58	24,92	0,15	0	6,91	7,33	0,14	100,03	$\text{An}_{34}\text{Ab}_{65}\text{Or}_1$
	1	68,78	19,97	0,05	0,02	0,46	10,69	0,04	100,01	$\text{An}_2\text{Ab}_{98}\text{Or}_0$
Тi-авгитовое габбро, БЛ-43	1	51,40	30,35	0,15	0,02	13,99	3,85	0,23	99,99	$\text{An}_{66}\text{Ab}_{53}\text{Or}_1$
	4	58,32	25,64	0,30	0,10	8,24	7,24	0,16	100	$\text{An}_{38}\text{Ab}_{61}\text{Or}_1$
	1	55,14	27,60	0,22	2,66	8,19	5,39	0,83	100,03	$\text{An}_{43}\text{Ab}_{52}\text{Or}_5$
Габбро, БЛ-54	2	63,79	23,95	0,02	0,02	2,88	9,44	0,11	100,21	$\text{An}_{14}\text{Ab}_{85}\text{Or}_1$
	1	63,38	23,70	0,05	0,02	4,04	7,97	0,89	100,05	$\text{An}_{21}\text{Ab}_{74}\text{Or}_5$
	1	59,11	26,39	0,13	0	7,22	6,36	0,96	100,17	$\text{An}_{38}\text{Ab}_{61}\text{Or}_1$
Габбро-пироксенит, БЛ-30	2	67,09	20,59	0,06	0,01	2,45	9,74	0,07	100,01	$\text{An}_{12}\text{Ab}_{88}\text{Or}_1$
	1	60,93	24,70	1,67	0,01	3,09	5,81	3,03	99,24	$\text{An}_{18}\text{Ab}_{61}\text{Or}_{21}$
	2	60,35	24,74	0,17	0,10	6,33	7,12	1,22	100,03	$\text{An}_{31}\text{Ab}_{62}\text{Or}_7$
	1	56,48	27,13	0	0,12	8,44	4,84	2,24	99,25	$\text{An}_{42}\text{Ab}_{44}\text{Or}_{14}$
Анортозит, БЛ-28	3	53,92	29,55	0,50	0,01	9,73	3,39	2,90	100	$\text{An}_{50}\text{Ab}_{32}\text{Or}_{18}$
	2	50,60	30,38	0,32	0	14,81	2,96	0,92	99,99	$\text{An}_{70}\text{Ab}_{25}\text{Or}_5$
Анортозит, БЛ-29	6	52,44	29,40	0,16	0	12,89	3,81	0,11	98,81	$\text{An}_{65}\text{Ab}_{34}\text{Or}_1$
	1	47,57	31,68	0,05	0,05	15,90	1,79	0,19	97,23	$\text{An}_{82}\text{Ab}_{17}\text{Or}_1$
Диабаз, БЛ-36	5	53,51	29,30	0,46	0,01	12,75	3,93	0,22	100,18	$\text{An}_{64}\text{Ab}_{35}\text{Or}_1$

4. Главные минералы-носители и минералы-концентраторы рудных элементов

Общеизвестно [27-31], что видовой состав и содержание аксессуарных минералов отражают степень обогащения магмы рудными элементами. Это подтверждается и результатами микрозондовых исследований формы нахождения и вещественные составы главных минералов-носителей, минералов-концентраторов рудных компонентов и рудогенерирующих флюидных обособлений пород Бельтауского габбро перидотитового массива, результаты которых приводятся ниже.

Магнетит считается типичным минералом основных и ультраосновных пород, но он в породах Бельтауского габбро-перидотитового массива пользуется весьма ограниченным распространением, образует точечную вкрапленность и характерен преимущественно как вторичный минерал, развивающийся при серпентинизации оливина в лерцолитах и оливиновых габбро (рис. 10).

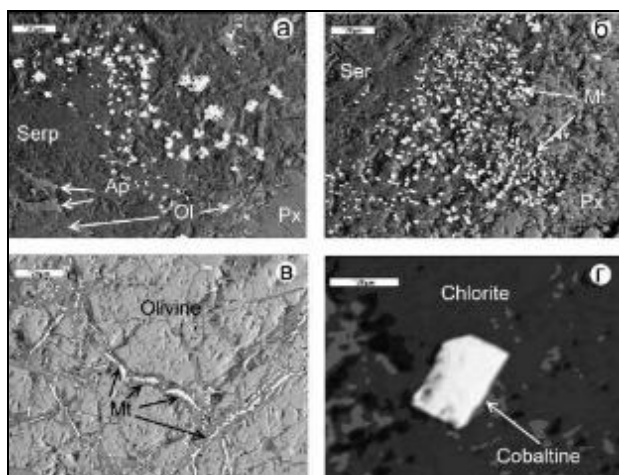


Рис. 1. Растровые снимки форм нахождения магнетита, ильменита и кобальтина в породах Бельтауского габбро-перидотитового массива

а-б – скопление зерен ильменита (а) и магнетита в серпентине (аншлиф БЛ-40, оливиновое габбро); в – формы выделения вторичных магнетитов в виде «конского хвоста» в серпентине, развивающиеся по трещинам оливина (БЛ-58- лерцолит); г – форма выделения кобальтина в хлорите (БЛ-54, габбро).



В титанавгитовых габбро встречаются относительно крупные кристаллы первичного (магматического) магнетита, ассоциирующие с пиритом и халькопиритом, в некоторых случаях зерна магнетита замещаются последними (рис. 11). Концентрации зерен магнетита уменьшаются с увеличением лейкократовости пород.

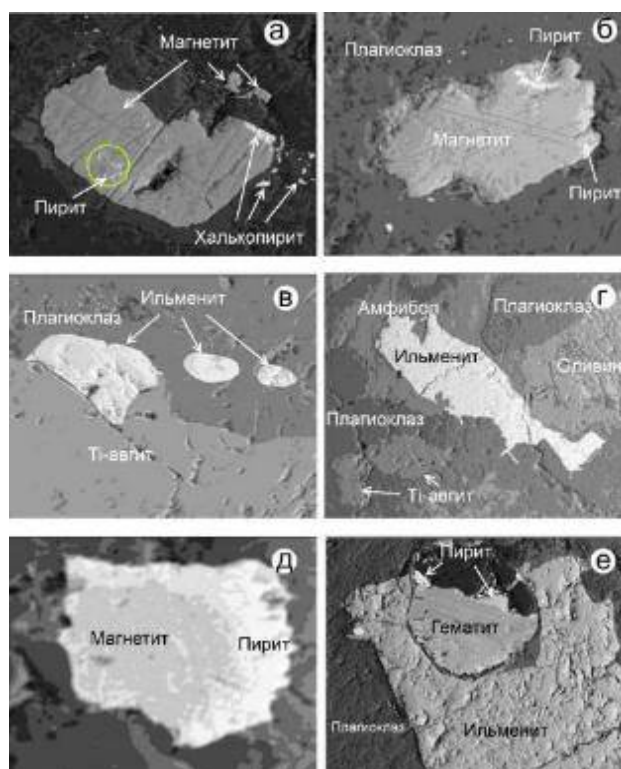


Рис. 11. Форма выделения магнетита, ильменита, гематита, пирита и халькопирита в титанавгитовом габбро (аншлиф БЛ-43)

а, б – взаимоотношение магнетита с пиритом; в, г – каплевидные выделения (в) и удлиненно корродированный кристалл (г) ильменита в межзерновом пространстве породообразующих минералов; д - замещение магнетита пиритом; е – кремнистая глобула (флюидное микрообособление), содержащая гематит и пирит в ильмените.

Первичные (магматические) магнетиты титанавгитовых габбро отличаются повышенными содержаниями меди (CuO – 1,13%), никеля (NiO – 1,11 %), кобальта (CoO – 0,14 %), платиноидов (ЭПГ – 0,18 %) и низкими – титана (TiO_2 – 0,05 %), марганца (MnO – 0,17 %) и хрома (Cr_2O_3 – 0,09 %) (табл. 5).

Таблица 5

Результаты микронзондовых анализов оксидных минералов железа и титана пород Бельтауского габбро-перидотитового массива, %

Название и номер породы	n	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	V ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	NiO	CoO	MgO	CaO	CuO	ZnO	Ag ₂ O	ЭПГ	Всего
Магнетит																	
Серпентинизир. лерцолит, БЛ-58	3	1,37	0,01	0	98,31	0	0,01	0,07	0	0	0	0,3	0	0	0	0	100
Оливиновое габбро, БЛ-40	2	1,08	0,01	1,17	97,07	0,03	0,07	0,50	0,09	0	0	0	0	0	0	0	100,02
Ti-авгитовое габбро, БЛ-43	7	4,72	0,05	0,27	88,48	0,17	0	0,09	1,11	0,14	0,44	0,90	1,13	0	0	0,18	97,68
Габбро-пироксенит, БЛ-30	1	0	0,07	0	96,63	0,49	0	0,27	0	0,70	1,85	0	0	0	0,03	0	100,04
Ильменит																	
Серпентинизир. лерцолит, БЛ-58	2	0,16	49,55	0,03	46,66	2,69	0,62	0,12	0	0,05	0	0,09	0	0	0	0	99,97
Ti-авгитовое габбро, БЛ-43	5	5,08	50,75	0,05	46,43	1,85	0,19	0,14	0,09	0	0	5,02	0	0	0	0,10	99,89
Оливиновое габбро, БЛ-40	2	0,08	51,33	0,01	46,37	0,94	0,43	0,05	0	0	0,58	0,02	0	0	0	0	99,81
Оливиновое габбро, БЛ-42	3	0,07	49,57	0,03	47,15	1,55	0,99	0	0,01	0,02	0	0,15	0	0	0,03	0,07	99,64
	1	5,00	51,55	0,70	34,57	2,41	0,58	0	0	0	0	3,99	0,15	1,05	0	0	100
Габбро, БЛ-54	2	0	50,49	0	46,49	2,04	0,06	0,32	0	0	0	0,04	0	0	0	0	99,44
Анортозит, БЛ-28	2	5,88	50,21	0,73	34,80	3,41	0	0,35	0	0	0,89	3,70	0	0	0	0	99,97
Анортозит, БЛ-29	3	0,08	51,08	0,04	42,89	4,78	0,27	0,08	0,07	0,06	0	0,47	0	0	0,07	0,66	100,55
Диабаз, БЛ-36	5	0,05	49,99	0,01	47,38	1,33	0,10	0,13	0,03	0,22	0	0,01	0	0,08	0	0,03	99,36
Диабаз, БЛ-49	4	0,06	50,16	0,08	44,64	1,25	0,76	0,20	0,15	0,01	0	0,04	0	0	0	0	97,35
Рутил																	
Анортозит, БЛ-29	2	0,24	96,00	0,12	0,21	0	0,47	0,06	0	0	0	0,77	0	0	0	0	97,87
Гематит и лимонит																	
Гематит-лимонитовая жила, БЛ-27	5	3,18	0	0,22	72,49	0,04	0	0,04	1,31	0,20	0	0	0,06	0	0,07	0	77,61
	3	3,15	0,01	0,32	87,63	0,01	0	0,04	0,25	0,13	0	0,04	0	0	7,25	0,08	98,91
Габбро, БЛ-44	5	6,73	0	0,05	75,96	0	0	0,24	1,38	0,11	0,64	2,14	1,41	0	0	0,07	88,73

В составе зерен магнетита габбро-пироксенитов присутствуют титан (TiO_2 – 0,07 %), марганец (MnO – 0,49 %), хром (Cr_2O_3 – 0,09 %), кобальт (CoO – 0,70 %) и серебро (Ag_2O – 0,03 %).

В перидотите и габбро кристаллы ильменита представлены удлиненными или изометричными зернами с ровными линиями ограничения (рис. 11 и -12). Размер от 0,2 до 1,5 мм. По трещинам, а иногда на поверхности прорастает землистым лейкоксеном и титанитом (рис. 12). Образует мельчайшие включения в цирконе и сам содержит мелкие кристаллы бадделейта – оксида циркония (рис. 13). В жильных типах габброидов ильменит встречается с шпинелидом – герцинитом.

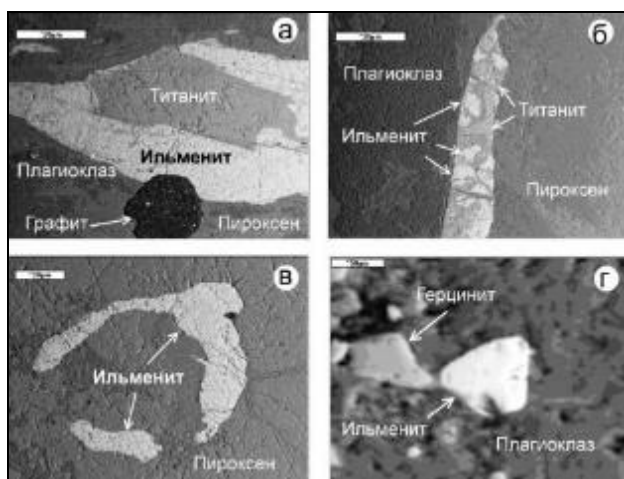


Рис. 12. Взаимоотношения ильменита, титанита, герцинита и пластинчатого графита в породах Бельтауского габбро-перидотитового массива

а – взаимоотношение замещенного титанитом ильменита с пластинчатым графитом в пироксене (аншлиф БЛ-54, габбро); б – замещение титанитом игольчатого кристалла ильменита в межзерновом пространстве пироксена и плагиоклаза (аншлиф БЛ-54, габбро); в – формы нахождения включений ильменита в пироксене (аншлиф БЛ-58, лерцолит); г – ильменит-герцинитовая парагенетическая ассоциация в порфиоровом выделении плагиоклаза (аншлиф БЛ-49, диабаз).

В ильменитах пород Бельтауского габбро-перидотитового массива всегда встречаются примеси марганца (MnO – 0,94-4,78 %),

ванадия (V_2O_5 – 0,06-0,94 %) и хрома (Cr_2O_3 – 0,05-0,35 %). Примеси никеля и кобальта определены в ильменитах габброидов и их жильных дериватах (NiO – 0,01-0,15 %; Co – 0,02-0,66 %). Некоторые кристаллы ильменита в оливиновом габбро являются носителями меди (CuO – 0,15%), цинка (ZnO – 1,05 %), серебра (Ag_2O – 0,03 %) и платиноидов (ЭПГ – 0,07 %). Последние выявлены в ильменитах титанавгитовых габбро (ЭПГ – 0,10 %), анортозитов (Ag_2O – 0,07 %, ЭПГ – 0,66 %) и диабазов (ZnO – 0,08 %, ЭПГ – 0,03 %).

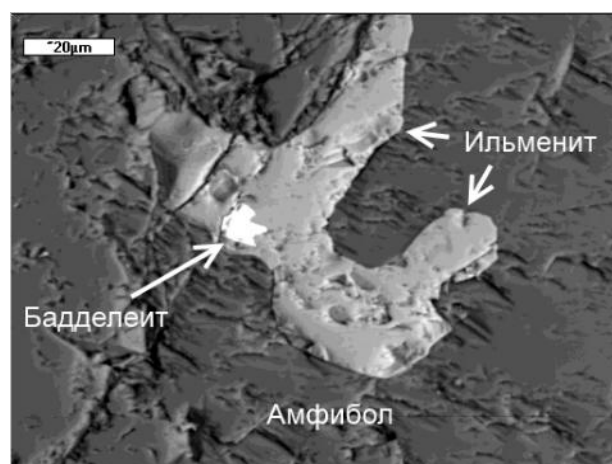


Рис. 13. Форма нахождения ильменита, содержащего бадделейта в амфиболе (аншлиф БЛ-40, оливиновое габбро)

Рутил в виде мелких оранжево-желтых призматических кристаллов присутствует в количестве до первых десятков г/т в титанавгитовых габбро, за исключением перидотитов, но наиболее типичен для анортозитов. В составе их отмечены примеси железа (FeO – 0,21 %), ванадия (0,47 %) и хрома (Cr_2O_3 – 0,06 %). Рутил часто замещен титанитом и это свидетельствует о значительном воздействии регрессивного метаморфизма на породы.

Гематит и лимонит в магнетитах и ильменитах габброидов массива образуют тонкие выростки, которые являются продуктом распада. Редко, в самом кристалле ильменита встречаются глобула – законсервированного и раскристаллизованного микрообособления кремнистого флюида, содержащий пластинчатый (коллоидный) гематит и микрораскристаллы пирита (рис. 2, е). Кроме того, в пределах массива, особенно в его апикальных частях широко развиты гематит-

лимонитовые жилы.

Гематиты и лимониты габброидов, и связанные с ними гидротермальные жилы отличаются высокими содержаниями примесей никеля ($\text{NiO} - 0,25-1,38 \%$), кобальта ($\text{Co} - 0,11-0,20 \%$), меди ($\text{CuO} - 0,06-1,41 \%$), серебра ($\text{Ag}_2\text{O} - 0,07-7,25 \%$) и платиноидов (ЭПГ – до $0,08 \%$) (табл. 5).

В близповерхностной части гематит-лимонитовых жил определено самородное золото в виде тонких чешуек и примазок на лимоните явно гипергенного происхождения. Размер чешуек золота $0,025-0,05-0,1$ мм, цвет желтый, часто с красноватой побелостью, блеск металлический, поверхность неровная, пробность весьма высокая 855-998 [32].

Титанит встречается во всех породах Бельтауского габбро-перидотитового массива в количестве от десятков до 900 грамм на тонну. Эта особенность, очевидно, связана с различным характером и степенью контаминации магмы. Иначе говоря, ассимиляция габброидной магмой Бельтауского массива

карбонатных пород сказалась в относительном насыщении ее известью и развитии известковистых породообразующих и акцессорных минералов (основной плагиоклаз, известковистые пироксены, титанит).

Минимальное количество (до 100 г/т) титанита содержится в серпентинизированных перидотитах (лерцолиты, плагилерцолиты), анортозитах и лейкократовом габбро, и дайках основного состава Бельтауского массива; максимальное в титанавгитовых габбро (900 г/т). Образует две генерации. Первая, ранняя, связана с изменением ильменита и образует мелкую вкрапленность в зернах последнего (рис. 12, а, б). Вторая, более поздняя, образует крупные от долей до нескольких сантиметров кристаллы от соломенно-желтого до медово-желтого цвета. Обычно это хорошо ограненные минералы конвертообразной формы. Результаты микрозондовых анализов титанита пород Бельтауского габбро-перидотитового массива приведены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты микрозондовых анализов титанита пород
Бельтауского габбро-перидотитового массива, %

Название и номер породы	n	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO^*	MnO	V_2O_3	Cr_2O_3	MgO	CaO	Всего
Оливиновое габбро, БЛ-42	1	30,07	37,42	1,55	0,69	0,02	0,53	0	0	27,35	97,63
Габбро-норит, БЛ-26	2	30,33	35,87	2,68	0,48	0	0	0,31	0	30,45	100,12
Габбро, БЛ-54	4	31,17	33,59	3,68	2,22	0,02	0,83	0,42	1,25	25,77	98,95
Габбро-пироксенит, БЛ-30	5	29,84	36,77	0,98	0,58	0,05	0,02	1,02	0,75	29,07	99,08
Анортозит, БЛ-28	2	18,00	59,58	0,84	2,62	0,33	0	0,31	0	17,13	98,81
	3	29,52	37,83	1,31	0,36	0,04	0	0,99	0	29,93	99,98
Анортозит, БЛ-29	2	30,03	38,89	0,84	0,23	0,01	0,30	0,07	0,05	27,12	97,54
	1	29,90	38,63	0,99	0,19	0	0,39	0,15	0	27,62	98,35

Примечание: в единичных кристаллах титанита анортозитов (проба БЛ-29) определены примеси серебра ($\text{Ag}_2\text{O} - 0,06 \%$) и платиноидов (ЭПГ - $0,42 \%$).

Гранаты в Бельтауском массиве гранаты установлены в габбро и его оливиновых и титанавгитовых разновидностях, габбро-норите и анортозите. Они представлены членами уграндитовой серии – гроссуляром и гидрогроссуляром (табл. 7). В качестве составляющих примесей в них присутствуют минералы пироп (до 5 %) и альмандина (до 8 %). Гранаты габброидов массива содержат

92-97 % гроссуляра и согласно У.А. Диру и др. [33] их можно отнести к числу наиболее чистых представителей этого минерального вида, хотя в гранате анортозита, помимо небольшого количества железа (FeO – 8,55 %), имеется также значительная примесь магния (MgO – 6,58 %). Гроссуляр и гидрогроссуляр являются продуктами кальциевого метасоматоза в габброидах массива.

Таблица 7

**Результаты микронзондовых анализов гранатов пород
Бельтауского габбро-перидотитового массива, %**

Название и номер породы	n	SiO_2	Al_2O_3	FeO^*	MnO	Cr_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	Всего	Примечание
Оливиновое габбро, БЛ-42	1	44,21	23,79	0,78	0,10	0,12	0,75	26,37	0	0	96,12	Гидрогроссуляр – $\text{Pr}_4\text{Alm}_2\text{Gr}_{94}$
Титанавгитовое габбро, БЛ-43	2	39,93	22,31	1,27	0	0,18	1,09	26,21	0,15	0,09	91,82	Гидрогроссуляр – $\text{Pr}_5\text{Alm}_3\text{Gr}_{92}$
Габбро-норит, БЛ-26	6	44,26	24,66	0,47	0,04	0,16	0,40	28,53	0,10	0,41	99,03	Гроссуляр – $\text{Pr}_2\text{Alm}_1\text{Gr}_{97}$
Габбро, БЛ-54	3	44,89	24,18	0,20	0	0,08	0,09	26,13	0,01	0,01	95,59	Гидрогроссуляр – $\text{Pr}_{0,5}\text{Alm}_{0,5}\text{Gr}_{99}$
Анортозит, БЛ-28	2	44,49	24,38	0,72	0,03	0,09	0,82	29,33	0	0,12	99,98	Гроссуляр – $\text{Pr}_4\text{Alm}_2\text{Gr}_{94}$
	1	41,80	25,40	8,55	0,21	0	6,58	17,07	0	0,40	99,06	Fe-Mg-гроссуляр – $\text{Pr}_{28}\text{Alm}_{20}\text{Gr}_{52}$
Анортозит, БЛ-29	2	43,64	23,55	0,08	0	0	0,61	26,18	0,03	0,08	94,27	Гидрогроссуляр – $\text{Pr}_3\text{Alm}_0\text{Gr}_{97}$

Примечание: в гидрогроссулярах оливинового габбро (БЛ-42) и анортозита (БЛ-29) содержится примесь фосфата (соответственно P_2O_5 0,59 % и 0,10 %).

Шпинель (хромшпинель, хромгерцинит и герцинит) определен в жильных разновидностях габброидов Бельтауского габбро-перидотитового массива (рис. 11, табл. 8). Присутствие шпинелида является важным индикатором относительно высоких термобарометрических условий кристаллизации пород. Однако совместное нахождение с гранатом указывает на условия кристаллизации пород в зоне шпинель-гранатового перехода.

В 1984 г. опубликованы статьи Г. Дика и Т. Булена [34] в которых обобщены данные, свидетельствующие о различиях химических составов минеральных фаз перидотитов дна океана и островных дуг. Эти различия особенно наглядны при рассмотрении аксессуар-

ных хромовых шпинелей, варьирующих в очень широких пределах – от малохромистых маложелезистых до магнезиохромистых. В работе Г. Дика и Т. Булена показано, что хромшпинелиды океанических перидотитов и дунитов характеризуются, как правило, пониженной хромистостью по сравнению с перидотитами островных дуг. Верхняя граница величин отношения $\text{Cr} / (\text{Cr} + \text{Al})$ для хромшпинелидов океанических перидотитов определена в 0,6 [34].

Согласно результатам исследований С.А. Паладжяна и Г.Г. Дмитренко [13] по петрогенетической типизации и выявлению геотектонической позиции перидотитов, последние по величинам параметра

Cr/(Cr+Al) аксессуарных шпинелей могут быть подразделены на несколько типов, соответствующих различным обстановкам их формирования: 1) высокоглиноземистые (0,08-0,25) лерцолитовые – фрагменты субконтинентального перидотитового фундамента, существовавшего на ранних стадиях развития небольших океанических бассейнов; 2) умеренно глиноземистые, среднехромистые (0,25-0,5) гарцбургитовые и лерцолитовые, принадлежащие перидотитовому основанию развитых океанических бассейнов геологического прошлого; 3) гарцбургитовые серии переходного типа с промежуточным составом хромшпинелидов (0,5-0,6), образовавшиеся при переработке перидотитов океанического типа наложенными на них процессами магматизма ранних стадий развития островных дуг; 4) высокохромистые (0,6-0,9) гарцбургитовые серии, образовавшиеся в фундаменте развитых островных дуг типа Идзу - Банинской, Марианской, Танга.

В диабазах Бельтауского массива зерна шпинели имеют размер 50-100 мкм (рис. 12). Как правило, зерна идиоморфные, иногда со скругленными углами или имеют округлую форму. Поверхность зерен обычно немного резорбирована. По составу они соответствуют хромшпинели, хромгерциниту и герциниту. Отношение Cr/(Cr+Al) в хромшпинели варьирует от 0,26 до 0,29. В нем отмечены примеси TiO_2 – 0,13-0,16 %, MnO – 0,28-0,38 %, V_2O_3 – 3,56-3,80 %, NiO – 0,04-0,24%, ZnO – 0,70-0,87 % (табл. 8).

Герцинит и хромгерцинит встречаются в ассоциации с диаспором. В составе первых кроме примесей титана (TiO_2 – 0,05-0,15 %), марганца (MnO – 0,15-0,24 %), ванадия (V_2O_3 – 0,16-1,34 %), никеля (NiO – 0,17-0,30 %) и цинка (ZnO – до 0,97 %), определены рений (Re – 0,05-2,68 %), осмий (Os – 0,11-0,64 %) и платиноиды (ЭПГ – до 0,33 %).

Диаспор является носителем осмия (Os – 1,08-1,54 %).

Таблица 8

Результаты микрозондовых анализов хромшпинели, герцинита и диаспора в жильных габброидах (диабазах) Бельтауского габбро-перидотитового массива, %

Компоненты	Хромшпинель		Герцинит и хромгерцинит			Диаспор	
	(1)	(1)	(2)	(1)	(1)	(1)	(1)
SiO_2	1,23	1,18	1,51	5,39	1,98	3,47	3,40
TiO_2	0,16	0,13	0,05	0,15	0,12	0,09	0,02
Al_2O_3	39,35	40,71	52,87	53,68	47,97	80,25	74,28
FeO^*	31,78	31,11	25,29	23,53	29,37	2,11	0
MnO	0,38	0,28	0,18	0,15	0,24	0,07	0,02
V_2O_3	3,56	3,80	0,18	0,16	1,34	0,06	0,26
Cr_2O_3	16,37	14,49	0,12	0,56	7,01	0,12	0,96
NiO	0,04	0,24	0,17	0,30	0,26	0	0
MgO	6,36	7,02	0	0	7,99	2,36	0
CaO	0,06	0,07	0,01	1,26	0,20	0,04	0,09
Na_2O	0	0	0	0	0	0,35	0
K_2O	0,17	0,10	0,03	0	0,20	0	0
SO_3	0	0	0	0	0	2,54	0,59
ZnO	0,70	0,87	0,62	0,97	0	0	0
MoO_3	0	0	0	0	0,05	0	0
Re	0	0	0,05	0	2,68	0	0
Os	0	0	0,11	0,64	0,59	1,54	1,08
B_{cero}	100,16	100	81,19	86,79	98,02	96,00	80,80
Cr/(Cr+Al)	0,2938	0,2625	0,0023	0,0103	0,1275	0,0015	0,0127

Минералы циркония в породах Бельтауского габбро-перидотитового массива представлены **бадделейтом, цирконолитом и цирконом**.

О том, что на ранних стадиях кристаллизации магма была недосыщена кремнезёмом, свидетельствует наличие акцессорных бадделейта – оксида циркония, цирконолита – сложного оксида титана-циркония-кальция (табл. 9).

Бадделейт слагает уплощённые призматические кристаллы длиной до 15 микрон. Образует срастания с ильменитом в высокотитанистом амфиболе (рис. 13). Содержит 0,79-2,04 % HfO_2 , 0,46-3,11 % TiO_2 , 0,02-0,30 % TR_2O_3 . В бадделейте анортозитов установлена примесь палладия (Pd – 0,24-0,35 %).

Таблица 9

Результаты микрозондовых анализов минералов циркония пород Бельтауского габбро-перидотитового массива, %

Компоненты	Бадделейт						Цирконолит		Циркон		
	БЛ-40		БЛ-29		БЛ-36		БЛ-40	БЛ-36	БЛ-40	БЛ-29	БЛ-49
	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(2)	(1)	(3)	(1)	(2)	(5)
SiO_2	10,55	0	0,05	0,15	2,26	0	0	2,75	33,15	32,57	33,15
TiO_2	0,46	3,11	0,92	0,62	0,57	1,46	23,05	27,16	0,15	0,02	0
Al_2O_3	1,85	0	0,37	0,31	0,69	0,25	0,50	0,45	0	1,06	0,66
FeO^*	3,73	1,12	0,36	0,44	0,99	1,03	5,65	6,14	5,65	0	0,52
V_2O_3	0	0	0	0,07	0,11	0,01	0,31	0,02	0,31	0	0
MnO	0,11	0,07	0	0,08	0,13	0,03	0	0	0,04	0,03	0
Cr_2O_3	0,51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO	6,49	0	0	0	0,47	0	0,64	0,29	0	0	0
CaO	0,10	0	0	0,04	0,86	0,12	5,53	6,49	0	0,02	0
ZrO_2	74,73	94,63	96,02	95,04	77,27	95,50	41,41	27,64	64,52	63,05	64,04
HfO_2	1,47	0,79	1,74	1,53	2,04	1,64	0,76	0,55	1,53	1,35	1,59
Ag_2O	0	0	0	0	0	0	1,06	0,94	0	0	0
Pd	0	0	0,35	0,24	0	0	0	0	0	0	0
CdO	0	0	0	0	0	0	0,93	0,48	0	0	0
ThO_2	0	0	0	0	0	0	10,70	7,89	0	0	0
UO_2	0	0	0	0	0	0	3,62	2,69	0	0	0
TR_2O_3	0	0,27	0,19	0,30	0	0,02	0	0	0,38	0,08	0,09
Сумма	100	99,99	100	98,82	85,39	100,06	94,16	83,49	100,08	98,18	100,05

Примечание: БЛ-40 – оливиновое габбро, БЛ-29 – анортозит, БЛ-36 и БЛ-49 – диабаз; цифры в скобках – количество анализов.

Цирконолит – очень редкий минерал циркония, образуется при высоких температурах, в результате изоморфного замещения Ti и Zr . В Бельтауском габбро-перидотитовом массиве единичные зерна минерала установлены только в оливиновом габбро и его жильном деривате (диабазе) в виде уплощенных октаэдров, размером максимально 10-20 мкм.

В цирконолите габброидов Бельтауского массива содержание главных компонентов TiO_2 , ZrO_2 , CaO меньше по сравнению с теоретическим ($\text{CaZrTi}_2\text{O}_7$), причиной которого является присутствие ряда второстепенных компонентов в минерале: SiO_2 (до 2,75 %), Al_2O_3 (0,45-0,50 %), FeO (5,65-6,14 %), V_2O_3 (0,02-0,31 %), MgO (0,29-0,64 %), ThO_2 (7,89-10,70 %), UO_2 (2,69-3,62 %) и HfO_2 (0,55-0,76 %).

%). Кроме того, в минерале содержатся примеси кадмия (CdO – 0,48-0,93 %) и серебра (Ag_2O – 0,94-1,06 %).

Циркон характерен для перидотитов, титанавгитовых и роговообманковых габбро Бельтауского массива. Он представлен короткопризматическими кристаллами дипирамидально-призматического габитуса и их обломками. Часто несет включения ильменита или сростается с ним.

В цирконе оливиновых габбро, анортозитов и диабазовых даек массива содержание элементов-примесей невелико. Гафний является постоянной примесью (HfO_2 – 1,35-1,39 %). Часто встречаются примеси алюминия (Al_2O_3 – до 1,06 %) и железа (FeO – до 5,65 %). Содержание редких земель незначительно (TR_2O_3 – 0,08-0,38 %).

Апатит в количестве от десятков до 150-950 г/т характерен для всех пород. Максимум в роговообманковом габбро и жильной серии, минимум в лейкократовом габбро. Образует две генерации, различные по форме кристаллов. Короткопризматические кристаллы первой генерации ассоциируют

обычно с пироксеном и плагиоклазом, образуя в нем вроски, вторая – с амфиболом, биотитом. Первая более характерна для титанавгитового габбро и перидотитов, вторая для роговообманкового габбро и пород дайковой серии. Обе генерации обычно бесцветны, изредка желтоваты. В обломках неотличимы друг от друга. Кристаллы отвечают гексагональным призмам с пирамидами на конце. В кристаллах второй генерации, часто встречаются выростки биотита и ильменита.

Результаты микрозондовых анализов апатитов пород Бельтауского габбро-перидотитового массива показывают повышенное количество в них редких земель (TR_2O_3 – 0,76-3,67 %), с резким преобладанием окислов церия, неодима и лантана (табл. 10).

В большинстве кристаллов апатита титанавгитовых габбро, кроме лантаноидов, определена примесь иттрия (Y_2O_3 – 2,14-2,71 %). Судя по присутствию ртути (HgO – 0,01-6,60 %) и серы (SO_3 – 0,27-2,47) мы предполагаем о наличии нанокристаллов киновари в апатите.

Таблица 10

**Результаты микрозондовых анализов апатита пород
Бельтауского габбро-перидотитового массива, %**

Название породы, место взятия	n	SiO_2	Al_2O_3	FeO^*	MgO	CaO	P_2O_5	Cl	SO_3	HgO	Y_2O_3	TR_2O_3	Сумма
Серпентинизир. лерцолит, БЛ-58	1	0	0	0,53	0,09	53,72	42,00	1,11	0	0	0	2,54	99,99
Оливиновое габбро, БЛ-40	3	0	0	0,41	0,16	54,35	43,16	0,16	0	0	0	1,37	99,61
Оливиновое габбро, БЛ-42	1	0	0	0,32	0	47,77	38,67	0	2,47	6,60	2,14	2,43	100,40
	4	0	0	0,29	0	52,13	41,86	0	0,27	0,01	2,71	2,78	100,05
Титанавгитовое габбро, БЛ-43	2	0	0,14	0,11	0,09	55,62	42,42	0,10	0	0	0	1,52	100
Габбро-пироксенит, БЛ-30	1	0,79	0,44	0,21	0,32	56,55	40,93	0	0	0	0	0,76	100
Анортозит, БЛ-29	3	0	0,12	0,11	0,02	52,92	42,76	0,34	0	0	0	3,67	99,94
Диабаз, БЛ-36	3	0	0	0,31	0,03	52,76	44,69	0,05	0	0	0	2,86	100,70
Диабаз, БЛ-49	1	0	0,30	0,38	0	52,23	44,15	0,14	0	0	0	2,95	100,15

Торит и гидроторит. При детальном изучении минералогии меланократовых габброидов и диабазовых даек Бельтауского

габбро-перидотитового массива на электронном микроанализаторе JEOL-8800Rh нами были обнаружены торит и гидроторит.

Во многих случаях ксеноморфные микровключения их расположены в амфиболе, флогопите и хлорите в пространственной ассоциации с апатитом и цирконом, редко на границе плагиоклаза и пироксена. В торите и гидроторите установлено относительно высокое содержание алюминия (Al_2O_3 – до 8,58 %), железа (FeO – до 9,36 %), титана (TiO_2 – до 2,46 %), ванадия (V_2O_3 – до 7,84 %), магния (MgO – до 9,04 %) и кадмия (CdO – до 1,78 %) (табл. 11).

В торитах и гидроторитах содержание редкоземельных элементов не высокое (TR_2O_3 – 0,65-7,16 %). Примесь урана определена в титанавгитовых габбро (UO_2 – 0,94 %) и диабазе (UO_2 – 1,86 %). Гидроторит оливинного габбро является носителем молибдена (MoO_3 – 0,28 %) и мышьяка (As_2O_3 – 1,42 %), а гидроторит диабаз – серебра (Ag_2O – 5,70 %).

Таблица 11

Результаты микронзондовых анализов торита и гидроторита пород Бельтауского габбро-перидотитового массива, %

Компоненты	Торит			Гидроторит		
	БЛ-42	БЛ-54	БЛ-49	БЛ-42	БЛ-43	БЛ-49
	(1)	(2)	(1)	(1)	(1)	(1)
SiO_2	33,89	24,63	27,74	11,54	15,03	23,62
TiO_2	0,03	0,10	2,46	0,07	0	2,36
Al_2O_3	7,86	1,19	8,58	1,02	0,34	8,06
FeO^*	1,72	1,05	6,30	1,17	1,69	9,36
V_2O_3	0	0	0,10	7,84	0	1,23
MgO	0,84	0	9,04	1,16	1,04	8,85
CaO	3,37	4,56	1,62	4,04	4,08	1,47
K_2O	4,46	0	4,04	0,24	0	0
SO_3	0	0	0,92	0	1,39	2,46
P_2O_5	0	0	0	0	3,13	0
Ag_2O	0	0	0	0	0	5,70
CuO	0	0	0,14	0	0	0,07
MoO_3	0	0	0	0,28	0	0
As_2O_3	0	0	0	1,42	0	0
TR_2O_3	7,16	5,54	5,93	5,83	5,64	5,93
CdO	1,46	0,67	0	1,78	0	0
ThO_2	37,50	58,13	29,71	53,15	44,31	29,71
UO_2	0	0	0	0	0,94	0
Сумма	98,29	95,87	96,58	89,54	81,07	96,58

Примечание: БЛ-42 – оливинное габбро, БЛ-43 – титанавгитовое габбро, БЛ-54 – габбро, БЛ-49 – диабаз; цифры в скобках – количество анализов.

Графит является характерным аксессуарным минералом пород Бельтауского габбро-перидотитового массива. Здесь К.М. Кромской выделено три генерации графита. Гра-

фит-1 образует рассеянную вкрапленность и небольшие мономинеральные скопления в мраморизованных известняках; явнокристаллический (широкие таблички, чешуйки и

кристаллы размером до 1-2 мм); ассоциирует с кальцитом. Графит-2 в виде рассеянной вкрапленности отмечен во всех разностях габбро; явнокристаллический (удлиненные чешуйки) вместе с ранними сульфидами образует включения в породообразующих минералах. Графит-3 наиболее распространенный, слагает зоны графитизированного габбро, образует вкрапленность в скарнах и небольшие скопления в известняках (полосы и пятна, отходящие от основных зон). Встречается в виде гнездообразных скоплений и рассеянной вкрапленности. Размер индивидов 0,004- 1,5 мм [32].

По представлению К.М.Кромской источником углерода является органическое вещество палеозойских известняков, ассимилированное интрузией габброидных пород. Высокая степень метаморфизма углеродистого вещества, обеднение приконтактового ореола, ксенолитов и скиалитов известняками в удалении от интрузива, наличие битумов и гуминовой кислоты в габброидных породах указывают на существенные перемещения углеродистого вещества в известняках под влиянием внедрившейся интрузии [32].

На сегодняшний день, на происхождение углеродистого вещества и чаще всего связываемой с ним благороднометалльной минерализации описываемых образований, высказываются различные взгляды. Среди них развиваются представления как об участии биогенного углерода черных сланцев и битуминозных известняков, широко распространенных на площадях локализации массивов гипербазитов, так и глубинного привноса углерода в составе восстановленных флюидов. Эти взгляды сочетаются в модели, предполагающей происхождение углеродизации в результате воздействия горячей точки, продуцирующей поток углеродсодержащего мантийного флюида, на субдуцирующую океаническую кору, содержащую углеродистые отложения [34-38].

В юго-восточной эндоконтактовой зоне массива нами установлены эруптивные брекчии, характеризующие продукты «внутрикамерного взрыва» (рис. 14). В составе последних, кроме обломков «габброидной матрицы», встречаются и кристаллокласты гра-

фита и сульфидных минералов. Находка подобных эруптивных брекчий ещё раз подтверждает представления предыдущих исследователей [43] об алмазоносности воронкообразного тела Бельтауского интрузива, которыми в лерцолитах под бинокулярном были найдены реликты алмаза.



Рис. 14. Эруптивная брекчия в теле роговообманового габбро. Юго-восточная эндоконтактовая зона Бельтауского массива

В результате микрозондового исследования нами в перидотите выявлены частично и полностью графитизированные рудонесущие карбонатные флюиды, законсервированные в пироксене. Кроме того, в последнем установлено скопление микрокристаллов графита и кольцообразное симплектитовое выделение магнетита (рис. 15).

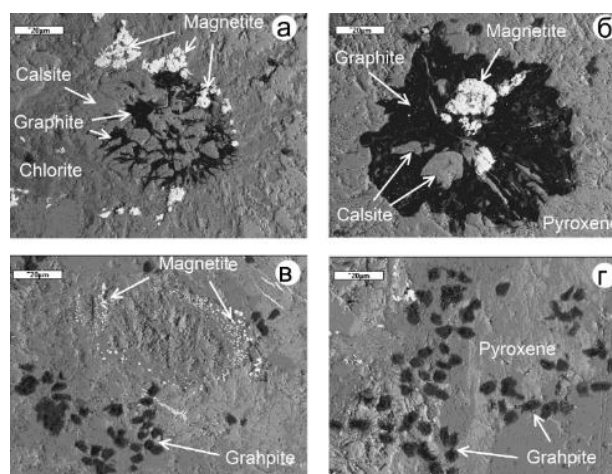


Рис. 15. Формы нахождения графита и рудных минералов в серпентинизированном лерцолите (аншлиф БЛ-58)

а- взаимоотношение графитизированного карбонатного флюида с магнетитом; б - пластинчатый графит в пироксене, содержащий включения кальцита и магнетита; в – взаимоотношение скопления микрокристаллов графита с кольцеобразными симплектитам магнетита в пироксене; г – скопление микрокристаллов графита в пироксене.

Карбонатные минералы в породах представлены кальцитом, кремнистым доломитом и сидеритом (табл. 12). В кальците определены примеси редкоземельных элементов (TR_2O_3 – 0,91-2,98 %). Сидерит относится к минералам-носителям меди (CuO – 0,13-0,60 %), никеля (NiO – 0,97-1,28 %) и кобальта (CoO – 0,16-0,29 %).

Таблица 12

Результаты микрозондовых анализов карбонатов пород Бельтауского габбро-перидотитового массива, %

Название и номер породы	n	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	NiO	CoO	CuO	TR ₂ O ₃	Сумма
Кальцит													
Серпентинизир. лерцолит, БЛ-58	3	0,31	0,12	5,00	1,49	10,13	35,87	0	0	0,03	0	1,43	54,38
	1	0,12	0	0,67	0,74	1,19	51,61	0	0	0	0	2,98	57,31
Габбро-пироксенит, БЛ-30	4	0,32	0,45	1,07	0,18	0,65	54,27	0,17	0	0	0	0,91	58,15
Кремнистый доломит													
Серпентинизир. лерцолит, БЛ-58	1	18,62	0,81	8,06	0,89	21,02	20,04	0,02	0	0	0	0	69,46
Сидерит													
Габбро, БЛ-44	2	3,63	0	63,39	0	0,21	0,09	0	1,28	0,29	0,13	0	69,02
Диабаз, БЛ-49	3	3,30	0,23	71,48	1,56	0	0,22	0	0,97	0,16	0,60	0	78,83

Впервые с применением микрозондового анализа пород Бельтауского массива установлены микроминералы серебра: сульфат серебра в плагиолерцолитах, силикат серебра в габбропироксенитах, палладистое серебро в габбро-диабазлах, кремнещелочно-хлоридные микрообособления рудогенерирующих флюидов, содержащие примеси легких платиноидов, золота и серебра, а также карбонат серебра в анортозитах (табл. 13).

Сульфидные минералы присутствуют от единиц, до нескольких десятков г/т. Наиболее характерны для лейкократового габбро и перидотитов, также для зон графитизации и графитовых тел Бельтауского массива. В составе сульфидов выделены пирротин, пирит, халькопирит, галенит, сфалерит, пентландит, кобальтин, (рис. 10, 11 и 16, табл. 14 и 15). Максимально развиты пирротин и пирит, ос-

тальные в явно подчиненном количестве. Для сульфидов характерна концентрация безникелистых разностей в составе анортозитов и лейкократового габбро. Никельсодержащие сульфиды характерны для перидотитов и меланократовых габброидов.

Для лейкогаббро и анортозитов максимальным развитием пользуются безникелистые сульфиды. Перидотиты отличаются и максимальным развитием магнетита, титаномагнетита и никелистых сульфидов, прочие акцессории в подчиненном количестве. Жильные габброиды в сравнении с габброидами отличаются повышенным содержанием ильменита и сульфидов (последние за исключением полосчатого габбро).

По данным В.В.Баранова, К.М.Кромской, Я.С.Высьневского в пределах Бельтауского интрузива сульфидно-никелевая минерали-

зация представлена двумя генетическими типами. Первый – магматический, это сингенетическая вкрапленность и скопления никельсодержащих сульфидов в неизменных габброидных и ультраосновных породах (сульфидно-медно-никелевая рудная формация). Второй – гидротермальный, это обильная вкрапленность никель-кобальт-, медьсодержащих сульфидов в зонах измененного, графитизированного габбро (сульфидная медно-никель-графитовая рудная формация).

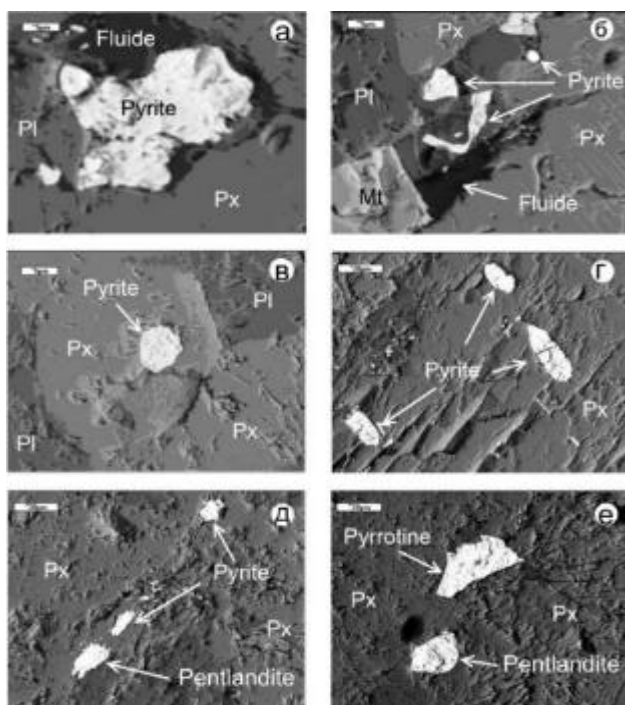


Рис. 15. Формы нахождения пирита, пирротина, пентландита и взаимоотношение их с пороодообразующими минералами габброидов Бельтауского массива

а, б – формы нахождения пирита в раскристаллизованном кремнистом флюиде и взаимоотношение их с пироксеном (Px), плагиоклазом (аншлиф БЛ-36, диабаз); в – микровключение пирита в ортопироксене (аншлиф БЛ-36, диабаз); микровключения пирита в клинопироксене (аншлиф БЛ-40, оливинное габбро); д, е – пирит-пентландитовая (д) и пирротин-пентландитовая ассоциация в клинопироксене (аншлиф БЛ-40, оливинное габбро).

Наблюдается приуроченность скоплений сульфидов преимущественно к ультраосновным разностям и в меньшей мере к габбро-

идным породам глубоких горизонтов массива. Тяготеют они к краевым частям интрузии, к придонным зонам и к границе разновидностей габброидных пород. Участки, обогащенные сульфидами, имеют вытянутую форму, мощность их от 0,2 до 50 м, они прерывисто протягиваются более чем на 500 м и могут быть отнесены к «висячим» залежам. В одной скважине, пробуренной в северо-восточной приконтактной зоне массива, встречена сульфидная жила мощностью более 0,15 м, что свидетельствует о возможном выявлении на месторождении Тасказган массивных руд инъекционного типа [1].

Пирротин образует рассеянную вкрапленность в серпентинизированных лерцолитах и меланократовых габброидах массива. Форма выделений каплеобразная, интерстиционная, тонкораспыленная. В них постоянно присутствуют примеси никеля (Ni – 0,06-4,61 %) и кобальта (Co – 0,09-0,78 %). Примеси платиноидов и редких земель характерны пирротинам оливинных и титанавгитовых габбро, габбро-норитов и их жильным дериватам (в %, Ru – 0,73-2,45; Rh – 0,03-0,72; Pd – 0,24-0,84; Pt – 0,00-0,25; TR – 0,36-1,14). В некоторых зернах пирротина определено: медь (Cu – 0,05-3,08 %), цинк (Zn – 0,13-0,44 %), золото (Au – 0,02-0,26 %) и серебро (0,05-0,24 %). В оливинных габбро и габбро-норитах большинство зерен пирротина являются носителями рения (Re – 0,24-0,38 %) и осмия (Os – 0,13-0,69 %).

Пирит широко распространен в меланократовых габброидах и диабазовых дайках. Образует рассеянную вкрапленность ксеноморфных зерен, иногда с реликтами пирротина, за счет которого развивается вместе с другими сульфидами. В титанавгитовых габбро пирит замещает магнетит и встречается вместе с гематитом в глобуле раскристаллизованного кремнистого флюида, законсервированного в ильмените (рис. 11, е). Пиритсодержащие раскристаллизованные кремнистые флюидные обособления установлены также в диабазовых дайках (рис. 16, а, б). Кроме того, каплеобразные микровключения пирита выявлены в ортопироксене диабазовых даек и клинопироксене оливинного габбро (рис. 16, в-д).

Пирит в этих породах является никельсодержащим (Ni – 0,34-6,28 %). Его тоже можно отнести к минералам-носителям платиноидов (в %, Ru – 0,29-1,12; Rh – 0,09-0,12; Pd – 0,38-1,10). В кристаллах пирита диабазовых даек определены примеси цинка (Zn –

0,03-0,26 %), серебра (Ag – 0,05-0,51 %), молибдена (Mo – 2,42-9,90 %). В единичных зернах выявлен рений (Re – 1,06 %). В пирите содержание примесей редких земель не превышает 0,50 %.

Таблица 13

Результаты микронзондовых анализов оксидов, силикатов, сульфатов и карбонатов серебра пород Бельтауского габбро-перидотитового массива, %

Компоненты	Оксид палладистого серебра		Сложный силикат серебра	Сложный сульфат серебра					Сложный TR-карбонат серебра
	БЛ-36		БЛ-30	БЛ-58					БЛ-29
SiO ₂	0	0,46	41,81	8,87	19,84	15,05	0,88	3,87	9,68
TiO ₂	0	0	0	0	0	0	0	0	1,68
Al ₂ O ₃	0	0,29	9,61	0	6,92	5,92	0,41	1,85	1,01
FeO*	1,07	1,64	2,20	6,83	5,51	5,29	1,02	2,04	1,17
MnO	0,07	0	0	0	0,17	0,18	0	0	0
V ₂ O ₃	0,95	0	0	0	0,11	0,07	0	0	9,16
Cr ₂ O ₃	0	0	0,78	0	0	0	0	0	0
NiO	0	0	0	0	0	0	0,11	0,13	0
CoO	0	0	0,06	0	0	0	0	0	0
MgO	0	0,74	5,28	8,63	7,05	6,66	0,78	1,98	1,05
CaO	0	0	4,11	1,03	6,12	4,15	0,09	1,69	6,56
Na ₂ O	0	0	4,92	0	0	0	0	0	0
P ₂ O ₅	0	0	0	0	0	0	0	0	1,37
Cl	0	0	0,17	1,73	1,34	1,42	1,95	1,72	0
SO ₃	0	0	0	18,45	13,43	16,34	21,48	20,58	1,55
Ag ₂ O	94,35	93,74	30,97	54,47	39,53	46,93	72,98	66,64	27,47
Au	0	0	0,16	0	0	0	0	0	0
TeO	0,52	0,41	0	0	0	0	0	0	0
Pd	2,48	2,69	0,41	0	0	0	0	0	0
As ₂ O ₃	0,49	0	0	0	0	0	0	0	4,44
TR ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0,28	0	10,29
Сумма	99,93	99,97	100,32	100,01	100,02	100,01	99,98	100,50	75,43

Примечание: БЛ-29 – анортозит, БЛ-30 – габбропироксенит, БЛ-36 – диабаз, БЛ-58 – серпентинизированный лерцолит.

Халькопирит – образует сростки с пиритом, пирротином и пентландитом. Содержит примесь никеля (Ni – 0,09-0,11 %), кобальта (Co – 0,01-0,31 %), серебра (Ag – 0,38-0,66 %) и легких платиноидов (в %, Ru – 2,08-3,76; Rh – 0,58-1,48; Pd – 0,24-1,29). В халькопирите титанавгитовых габбро определе-

ны молибден (Mo – 11,88 %) и осмий (Os – 0,37 %).

Галенит в небольших количествах наблюдается в анортозите, **сфалерит** – в диабазовых дайках. Первому характерны примеси серебра (Ag – 0,34 %) и родия (Rh – 0,38 %).

Пентландит – главный минерал-концентратор никеля (Ni – 20,28-30,29 %), установлен нами в серпентинизированных лерцолитах и оливиновых габбро Бельтауского массива. Встречается вместе с пиритом и пирротинном (рис. 7, е). Изометричные зерна размером 0,02 – 0,05 мм. В пентландите постоянно присутствуют кобальт (Co – 1,59-3,63 %) и медь (Cu – 0,12-11,42 %).

Кобальтин – сложный сульфоарсенид кобальта, никеля и железа встречается в диабазовых дайках массива (рис. 10, г; табл.15). Он относится к минералам носителям молибдена (Mo – 1,03-5,81 %), серебра (Ag – 0,08-0,20 %), золота (Au – до 0,05 %) и легких платиноидов (ЭПГ – до 0,46 %).

Таблица 14

Результаты микронзондовых анализов пирротина и пирита пород Бельтауского габбро-перидотитового массива, %

Элементы	Пирротин										Пирит			
	БЛ-58	БЛ-57			БЛ-40		БЛ-43		БЛ-26	БЛ-36		БЛ-43	БЛ-49	
	(2)	(2)	(2)	(1)	(4)	(1)	(2)	(6)	(3)	(7)	(3)	(2)	(2)	(1)
Si	0,11	0,50	0,52	0	0,19	1,54	0,40	0,34	0,26	0,48	0,76	0,27	0,14	0,33
Al	0	0	0,01	0	0,03	0	0	0	0	0	0,05	0	2,47	0
Fe	63,28	55,71	60,20	59,67	63,07	56,09	60,36	54,48	55,58	54,92	48,84	51,98	51,42	50,75
Mn	0,01	0,05	0,07	0,09	0	0,21	0,10	0,10	0,04	0,03	0,18	0	0,15	0,09
Cr	0	0	0,14	0	0	0	0	0,26	0	0,05	0	0,27	0,25	0
Ni	0,96	4,61	0,09	0,11	0,08	1,08	0,48	0,39	0,34	0,20	0,81	0,56	0,34	0,28
Co	0,21	0,41	0,22	0,24	0,08	0,27	0,09	0,68	0,78	0,42	0,02	0	0	0
S	35,35	32,45	34,39	32,89	33,56	36,19	34,98	37,26	39,93	38,70	43,43	29,71	33,54	37,14
Cu	0,05	0,11	0	3,08	0	1,39	0	0	0	0	1,86	0	0	0,04
Zn	0,19	0,14	0	0,30	0	0	0,13	0,29	0,44	0,41	0	0,26	0,03	0,10
Au	0	0	0	0,12	0	0	0	0	0,02	0,26	0	0	0	0
Ag	0	0	0	0	0,05	0	0,10	0,24	0	0,24	0	0,51	0	0,05
Mo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9,90	2,42	0
Re	0	0	0	0	0,38	0	0	0,24	0	0	0	0	1,06	0
Os	0	0	0	0	0,13	0	0,69	0	0	0	0	0	0	0
ЭПГ	Ru	0	0	0	0,73	0	1,98	0,52	2,45	0	2,16	0,29	3,10	0,95
	Rh	0	0	0	0,11	0,03	0,29	0,29	0,72	0	0,61	0,46	1,12	0,09
	Pd	0	0	0	0,45	0	0,24	0,51	0,84	0	0,79	0,69	1,10	0,38
	Pt	0	0	0	0,24	0,19	0	0	0	0,15	0,25	0	0,29	0
TR	0	0	0	0,56	0,68	0	0,36	1,14	1,10	0,75	0	0,50	0,45	0,43
Сумма	99,56	93,98	54,46	98,59	98,47	99,28	99,01	99,43	98,40	100,37	97,39	99,57	92,27	96,63

Примечание: здесь и далее в табл.-11: БЛ-58 – серпентинизированный лерцолит, БЛ-57 – серпентинизированный троктолит, БЛ-40 – оливиновое габбро, БЛ-43 – титанавгитовое габбро, БЛ-26 – габбронорит, БЛ-36 и БЛ-49 – диабаз; цифры в скобках – количество анализов.

5. Геохимическая специализация Бельтауского габбро-перидотитового массива

Для характеристики геохимической специализации перидотитов, мелано- и мезократовых габброидов, лейкократовых габбро и анортозитов Бельтауского массива, а также

их дериватов проведены масс-спектрометрические анализы пород, результаты которых приведены в табл. 16.

Геохимическая специализация перидотитов Бельтауского габбро-перидотитового массива характеризуется ярко выраженными повышенными содержаниями никеля и кобальта (Ni – до 1200 г/т, в среднем 623 г/т,

Со – до 110 г/т, в среднем 82 г/т), которые резко превышают содержания этих элементов, чем в мелано- и мезократовых габбро (Ni – до 240 г/т, в среднем 127 г/т, Со – до 91 г/т, в среднем 41 г/т), лейкограббро и анортозитах (Ni – до 220 г/т, в среднем 99 г/т, Со – до 30 г/т, в среднем 18 г/т).

Геохимическая специализация перидотитов Бельтауского габбро-перидотитового массива характеризуется ярко выраженными повышенными содержаниями никеля и кобальта (Ni – до 1200 г/т, в среднем 623 г/т,

Со – до 110 г/т, в среднем 82 г/т), которые резко превышают содержания этих элементов, чем в мелано- и мезократовых габбро (Ni – до 240 г/т, в среднем 127 г/т, Со – до 91 г/т, в среднем 41 г/т), лейкограббро и анортозитах (Ni – до 220 г/т, в среднем 99 г/т, Со – до 30 г/т, в среднем 18 г/т). Диабазовые дайки массива также характеризуются повышенными содержаниями этих элементов (Ni – до 330 г/т, в среднем 140 г/т, Со – до 53 г/т, в среднем 35 г/т).

Таблица 15

Результаты микрондовых анализов халькопирита, галенита, сфалерита, пентландита и кобальтина пород Бельтауского габбро-перидотитового массива, %

Элементы	Халькопирит			Галенит	Сфалерит	Пентландит			Колумбит	
	БЛ-43	БЛ-26	БЛ-49	БЛ-29	БЛ-49	БЛ-58	БЛ-40		БЛ-54	
	(2)	(1)	(1)	(2)	(1)	(2)	(2)	(1)	(1)	(4)
Si	0,14	6,21	1,41	1,46	2,40	0,15	0	0	0,22	0,01
Al	0,03	0,45	0,49	0,66	0,98	0	0,03	0	0	0
Fe	26,83	24,01	25,24	0,31	5,20	34,01	31,10	33,27	8,51	6,22
Mn	0,10	0	0,07	0,03	0,05	0,01	0,06	0	0,02	0,02
Cr	0	0,20	0,12	0	0,15	0	0,49	0,92	0,4	0,04
Ni	0,11	0,09	0,09	0	0	30,10	30,29	20,28	5,88	8,09
Co	0,05	0,34	0,01	0	0	2,15	3,63	1,59	19,26	20,39
S	23,79	28,53	25,97	12,12	34,40	32,15	30,99	29,79	7,46	17,33
As	0	0	0	2,19	0	0	0	0	52,25	45,12
Cu	29,13	26,27	28,37	0,24	0	0,12	0,14	11,42	0	0
Pb	0	0	0	73,09	0	0	0	0	0	0
Zn	0	0	0,25	0	51,93	0	0,03	0	0	0
Au	0	0	0	0	0	0	0,68	0	0	0,05
Ag	0,65	0,38	0,66	0,34	0	0	0,04	0	0,20	0,08
Mo	11,88	0	11,29	0	0	0	0	0	5,81	1,03
Re	0	0	0	0	1,77	0	0	0	0	0
Os	0,37	0	0	0	0,59	0	0	0	0	0
ЭПГ	Ru	3,76	2,08	3,44	0	0	0	0	0	0,33
	Rh	1,48	0,58	1,21	0,38	0	0	0	0	0,02
	Pd	1,29	0,24	1,21	0	0	0	0,03	0,18	0,11
	Pt	0	0	0	0	0	0,50	0	0	0
TR	0,16	0	0	0	0	0	0,55	0,48	0	0,18
Сумма	100,14	89,38	99,98	90,82	99,83	98,69	98,56	97,93	100,01	99,02

Таблица 16

Результаты масс-спектрометрического анализа пород Бельтауского габбро-перидотитового, в г/т

Номера проб	Li	Be	Rb	Cs	Ba	Sr	B	P	Ti	Fe	Mn	V	Cr	Co	Ni	Nb	Ta	Sn	Mo	W	Re	Zr	Hf
Серпентинизированные лерцолиты и плагиолерцолиты																							
БЛ-8/15	9	0,07	19	1,71	51	2890	20	76	1157	4971	141	54	37	6	126	2,21	0,17	0,67	0,95	0,40	0,00	6	0,28
БЛ-57/17	10	0,82	27	1,40	110	150	8	330	3200	71000	1000	44	180	100	1200	2,60	0,31	1,20	1,40	0,89	0,00	52	1,30
БЛ-58/17	11	0,30	9	0,95	40	120	8	240	1800	75000	1100	98	320	96	460	0,81	0,09	0,40	1,10	0,83	0,00	8	0,35
БЛ-59/17	4	0,22	5	0,42	27	65	12	250	1200	68000	990	61	200	110	710	0,81	0,10	0,45	1,00	0,79	0,00	7	0,27
БЛ-60/17	17	0,64	33	2,30	160	110	19	1500	4700	61000	970	43	150	100	620	3,00	0,30	1,20	0,84	1,20	0,00	22	0,75
Габбро-нориты, Тi-авгитовое и роговообманоковые габбро																							
БЛ-10/15	23	0,61	31	1,57	88	178	17	405	3495	36017	604	88	148	21	47	3,26	0,28	1,28	0,73	0,56	0,00	13	0,73
БЛ-15/15	21	1,10	31	1,35	84	188	28	591	10539	44162	637	146	90	35	176	6,92	0,56	1,39	0,85	0,63	0,00	15	0,68
БЛ-26/17	11	0,68	24	1,20	115	328	26	149	5392	39959	557	139	133	29	65	0,96	0,17	1,70	0,92	2,75	0,01	129	3,82
БЛ-30/17	11	0,38	5	0,18	33	135	27	240	4869	39399	856	273	1739	28	108	1,61	0,31	0,74	1,05	0,54	0,01	52	1,76
БЛ-44/17	14	0,87	10	0,33	140	300	13	980	4700	59000	1000	180	170	91	240	2,00	0,18	0,42	2,30	2,00	0,00	10	0,45
Лейкогаббро и анортозиты																							
БЛ-22/17	5	0,11	1	0,06	22	427	38	162	288	6626	27	7	29	2	57	0,55	0,08	0,18	1,79	0,32	<0.007	3	0,17
БЛ-28/17	29	0,60	50	2,73	197	667	44	234	1640	18295	300	50	92	12	53	1,39	0,15	0,50	1,83	1,28	<0.007	10	0,33
БЛ-29/17	16	0,67	28	1,46	166	414	29	277	1731	23492	348	69	115	18	97	1,33	0,11	0,47	2,09	0,37	0,02	19	0,58
БЛ-53/17	8	1,10	27	0,58	120	320	9	260	8600	43000	820	190	390	26	69	3,40	0,43	2,50	0,81	2,70	0,00	46	1,60
БЛ-55/17	7	0,84	30	0,94	90	230	11	260	7900	42000	650	90	100	30	220	2,30	0,16	1,70	3,20	1,90	0,00	43	1,30
Дайки основного состава																							
БЛ-6/15	53	1,04	16	2,85	155	284	34	663	4881	42850	628	98	149	27	51	5,59	0,45	1,83	1,09	0,67	0,00	116	3,08
БЛ-7/15	55	1,07	32	4,61	167	308	18	601	4420	40560	676	93	154	29	98	4,84	0,40	1,66	0,95	0,55	0,00	102	2,64
БЛ-32/17	21	2,64	37	1,04	1407	1108	28	4485	8246	66232	1041	170	287	35	197	32,48	2,10	2,75	1,68	0,86	<0.005	198	5,20
БЛ-36/17	11	1,10	6	0,31	140	260	24	1800	9000	72000	1200	180	190	53	62	4,40	0,33	0,48	2,90	2,60	0,00	32	0,82
БЛ-49/17	6	0,65	5	0,30	83	180	7	280	4200	52000	800	160	210	39	100	2,30	0,28	0,43	1,60	0,50	0,00	8	0,42
БЛ-51/17	2	0,24	6	0,22	150	370	11	330	1900	17000	88	160	400	27	330	1,20	0,15	0,52	7,20	0,66	0,00	10	0,59

Продолжение табл. 16

Номера проб	Li	Be	Rb	Cs	Ba	Sr	B	P	Ti	Fe	Mn	V	Cr	Co	Ni	Nb	Ta	Sn	Mo	W	Re	Zr	Hf
Метасоматиты и рудоносные жилы																							
БЛ-12/15	10	1,24	35	2,63	85	89	43	203	5094	92129	112	128	120	42	921	6,63	0,49	1,88	2,11	1,48	0,00	19	0,85
БЛ-13/15	77	2,10	58	29,48	26	206	54	231	6648	168784	431	38	33	148	2384	7,44	0,53	1,17	1,01	0,85	0,00	14	0,59
БЛ-18/17	7	0,36	2	0,12	19	208	16	769	2262	31346	37	126	78	4	261	3,02	0,31	1,31	8,64	0,94	<0.007	50	1,85
БЛ-21/17	19	0,91	1	0,12	37	1798	181	1806	3400	354709	73	325	65	20	509	0,73	0,09	1,73	68,21	1,82	<0.007	95	2,33
БЛ-24/17	7	0,29	15	0,93	91	126	34	224	5259	4180	76	99	151	6	123	3,49	0,25	0,97	3,44	0,72	0,01	30	0,93
БЛ-27/17	6	1,84	2	0,15	64	119	419	1397	960	590307	160	16	37	235	5585	6,64	0,44	0,30	20,22	0,40	<0.007	37	0,63
БЛ-39/17	9	1,40	3	0,18	94	390	17	1100	270	67000	8500	77	31	2200	5400	0,46	0,06	0,22	6,30	54,00	0,00	22	0,48
БЛ-45/17	13	1,10	56	0,83	240	360	18	980	2500	25000	400	130	110	67	480	0,99	0,13	0,56	2,20	1,50	0,00	20	0,79
БЛ-46/17	14	0,90	28	1,30	120	960	11	950	2500	52000	330	130	150	48	730	1,40	0,15	0,74	6,70	1,60	0,00	12	0,70

Продолжение табл. 16

Номера проб	Y	Sc	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Cu	Zn	Pb	Ag	Au*	Pt*	Cd
Серпентинизированные лерцолиты и плагиолерцолиты																							
БЛ-8/15	2	3	2,8	3,9	0,8	3,2	0,63	0,16	0,52	0,08	0,45	0,10	0,31	0,05	0,41	0,06	208	11	4,60	0,56	<0,05	0,00	0,02
БЛ-57/17	8	7	5,5	17,0	2,0	8,3	2,00	0,47	2,00	0,31	2,00	0,40	1,10	0,16	1,10	0,16	100	82	6,90	0,18	<0,05	0,00	0,09
БЛ-58/17	5	14	2,3	5,2	0,9	4,0	1,10	0,40	1,10	0,18	1,20	0,24	0,66	0,10	0,67	0,10	84	68	2,90	0,08	<0,05	0,00	0,07
БЛ-59/17	3	8	2,0	4,5	0,7	3,0	0,71	0,30	0,71	0,11	0,77	0,16	0,44	0,07	0,49	0,07	49	73	2,10	0,06	<0,05	0,00	0,05
БЛ-60/17	14	8	13,0	30,0	3,9	16,0	3,50	0,62	3,30	0,50	3,10	0,61	1,60	0,22	1,40	0,19	130	80	4,80	0,09	<0,05	0,00	0,06
Габбро-нориты, Тi-авгитовое и роговообманковые габбро																							
БЛ-10/15	14	16	8,7	22,6	2,9	12,5	3,13	1,04	3,03	0,51	3,31	0,64	1,77	0,27	1,71	0,24	22	46	5,61	0,06	<0,05	0,00	0,04
БЛ-15/15	6	10	6,4	19,9	2,0	7,9	1,77	0,59	1,50	0,25	1,47	0,29	0,78	0,12	0,80	0,11	205	72	7,61	0,12	<0,05	0,01	0,05
БЛ-26/17	9	18	5,3	14,7	1,8	8,2	1,90	0,59	2,05	0,32	2,03	0,37	1,07	0,17	1,08	0,16	75	45	3,37	0,25	<0,05	0,01	0,07
БЛ-30/17	20	54	5,7	17,9	2,1	9,6	2,78	0,69	3,30	0,56	4,00	0,78	2,19	0,39	2,01	0,29	17	45	3,45	0,13	<0,05	0,01	0,06
БЛ-44/17	14	29	5,7	17,0	2,3	10,0	2,60	1,10	2,70	0,45	2,90	0,58	1,60	0,22	1,50	0,20	2100	81	4,50	0,12	<0,05	0,00	0,09

Продолжение табл. 16

Номера проб	Y	Sc	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Cu	Zn	Pb	Ag	Au*	Pt*	Cd
Лейкогаббро и анортозиты																							
БЛ-22/17	1	1	1,3	3,8	0,4	1,4	0,24	0,06	0,24	0,03	0,20	0,03	0,08	0,02	0,07	0,01	168	23	1,41	0,01	<0,05	0,00	0,03
БЛ-28/17	5	7	5,0	11,2	1,3	5,1	1,09	1,00	1,04	0,17	1,01	0,19	0,55	0,08	0,55	0,07	11	34	5,97	0,03	<0,05	<0,002	0,03
БЛ-29/17	8	10	7,1	16,4	1,9	7,5	1,67	1,11	1,54	0,25	1,64	0,33	0,78	0,13	0,74	0,10	109	35	4,99	0,05	<0,05	<0,002	0,03
БЛ-53/17	17	32	6,3	19,0	2,6	11,0	3,00	0,93	3,00	0,52	3,60	0,71	1,90	0,28	1,80	0,25	9	61	3,90	0,11	<0,05	0,00	0,07
БЛ-55/17	6	9	5,3	14,0	1,5	6,0	1,40	0,73	1,40	0,22	1,50	0,31	0,85	0,13	0,90	0,13	100	54	3,60	0,15	<0,05	0,00	0,07
Дайки основного состава																							
БЛ-6/15	15	15	11,3	31,1	4,1	16,8	4,01	1,14	3,73	0,62	3,90	0,75	2,03	0,29	1,96	0,27	363	57	8,85	0,23	<0,05	0,01	0,08
БЛ-7/15	14	15	9,9	27,2	3,5	14,6	3,54	0,93	3,27	0,53	3,33	0,65	1,77	0,26	1,66	0,23	129	53	8,67	0,21	<0,05	0,01	0,10
БЛ-32/17	19	21	69,2	157,9	16,4	60,9	9,44	2,57	7,14	0,82	4,20	0,71	1,75	0,24	1,50	0,22	103	102	15,77	0,44	<0,05	0,02	0,10
БЛ-36/17	14	41	6,7	19,0	2,6	11,0	2,70	1,10	2,70	0,43	2,70	0,53	1,50	0,19	1,30	0,18	43	91	3,50	0,12	<0,05	0,00	0,09
БЛ-49/17	6	17	4,8	13,0	1,6	7,0	1,60	1,00	1,70	0,27	1,80	0,37	1,10	0,15	1,10	0,16	38	77	4,80	0,06	<0,05	0,00	0,05
БЛ-51/17	5	16	4,0	12,0	2,4	12,0	3,40	1,20	3,20	0,51	3,00	0,47	1,10	0,15	1,10	0,12	1000	23	10,00	1,10	<0,05	0,00	0,03
Метасоматиты и рудоносные жилы																							
БЛ-12/15	4	13	4,2	5,2	1,3	5,1	1,18	0,28	1,10	0,19	1,24	0,25	0,81	0,14	1,18	0,18	87330	29	73,26	0,72	<0,05	0,02	0,04
БЛ-13/15	118	22	11,1	26,1	3,1	12,7	4,52	1,55	7,89	1,85	14,19	3,23	10,05	1,40	8,93	1,30	499	98	7,91	0,07	<0,05	0,00	0,04
БЛ-18/17	6	39	9,5	8,9	1,8	6,4	1,42	0,21	1,36	0,18	1,26	0,25	0,73	0,12	0,79	0,14	133	17	9,90	0,32	<0,05	0,01	0,06
БЛ-21/17	5	6	4,2	12,5	1,7	7,5	1,71	0,51	1,48	0,22	1,30	0,23	0,60	0,09	0,62	0,09	1509	33	2,88	0,32	<0,05	0,01	0,14
БЛ-24/17	2	9	2,7	5,6	0,9	3,7	0,79	0,36	0,69	0,10	0,52	0,10	0,25	0,04	0,29	0,04	51	23	4,37	0,19	<0,05	0,00	0,03
БЛ-27/17	13	4	2,5	6,2	0,7	3,3	0,91	0,35	1,40	0,27	2,12	0,48	1,54	0,29	1,94	0,28	761	120	2,53	0,12	<0,05	0,00	0,10
БЛ-39/17	41	7	15,0	75,0	7,8	35,0	9,10	2,30	9,30	1,50	9,20	1,80	4,70	0,63	4,00	0,59	99000	220	5,20	0,09	<0,05	0,00	0,46
БЛ-45/17	12	24	11,0	25,0	3,6	15,0	3,80	1,10	3,40	0,51	3,10	0,56	1,50	0,19	1,20	0,16	980	39	5,80	0,15	<0,05	0,00	0,08
БЛ-46/17	20	26	13,0	30,0	4,6	21,0	5,30	1,30	5,10	0,78	4,80	0,88	2,30	0,30	1,90	0,26	300	43	6,00	0,23	<0,05	0,00	0,26

Окончание табл. 16

Номера проб	As	Se	Sb	Te	Bi	Th	U
Серпентинизированные лерцолиты и плагиолерцолиты							
БЛ-8/15	29	4,0	0,28	0,21	0,70	2,59	1,53
БЛ-57/17	20	4,7	0,22	0,07	0,29	1,80	2,70
БЛ-58/17	16	4,6	0,44	0,18	0,13	0,58	0,73
БЛ-59/17	17	4,6	0,19	0,21	0,09	0,53	0,86
БЛ-60/17	36	4,6	0,46	0,02	0,10	1,60	1,70
Габбро-нориты, Ti-авгитовое и роговообманоковые габбро							
БЛ-10/15	11	3,2	0,73	0,03	0,07	3,02	1,00
БЛ-15/15	25	6,1	0,51	0,07	0,08	3,06	1,53
БЛ-26/17	13	1,7	0,26	0,03	0,29	1,08	0,86
БЛ-30/17	23	0,3	0,59	0,14	0,40	1,56	1,08
БЛ-44/17	25	5,0	0,31	0,06	0,26	0,82	10,00
Лейкогаббро и анортозиты							
БЛ-22/17	24	0,3	0,17	0,05	0,08	0,44	4,29
БЛ-28/17	31	1,3	0,40	0,05	0,14	0,92	0,53
БЛ-29/17	20	0,4	0,43	0,08	0,07	1,34	0,55
БЛ-53/17	29	4,6	0,96	0,08	0,08	3,00	1,60
БЛ-55/17	30	4,7	0,93	0,07	0,14	1,80	1,50
Дайки основного состава							
БЛ-6/15	39	4,0	1,24	0,04	0,11	4,49	2,00
БЛ-7/15	19	4,9	1,14	0,03	0,11	4,00	1,84
БЛ-32/17	21	2,5	0,85	0,07	0,40	13,41	5,00
БЛ-36/17	23	4,9	0,87	0,04	0,03	0,92	0,49
БЛ-49/17	13	4,3	0,19	0,05	0,38	0,90	0,61
БЛ-51/17	100	4,3	0,17	0,07	0,14	1,10	4,50
Метасоматиты и рудоносные жилы							
БЛ-12/15	42	3,8	1,68	0,64	0,32	1,75	2,72
БЛ-13/15	32	4,3	0,57	0,06	0,10	3,48	2,45
БЛ-18/17	91	4,6	3,18	0,58	0,16	4,45	25,55
БЛ-21/17	303	3,4	3,41	0,22	0,26	9,43	94,25
БЛ-24/17	89	1,5	0,22	0,10	0,08	1,13	1,12
БЛ-27/17	52	14,9	0,23	0,08	0,22	3,34	4,98
БЛ-39/17	160	5,8	2,20	0,05	0,34	1,30	500
БЛ-45/17	35	4,8	0,15	0,10	0,05	0,89	1,40
БЛ-46/17	41	4,9	0,37	0,14	0,22	2,30	3,90

Мелано- и мезократовые габброиды являются относительно медоносными (Cu – до 2100 г/т, в среднем 484 г/т), чем перидотиты

(Cu – до 208 г/т, в среднем 114 г/т), лейкогаббро и анортозиты (Cu – до 168 г/т, в среднем 79 г/т).

В жильных дериватах габброидов также отмечаются высокие содержания меди (Cu – до 1000 г/т, в среднем 279 г/т).

Вместе с тем, высокие содержание титана и хрома определены в мелано- и мезократовых габброидах массива (Ti – до 10539 г/т, Cr – 1739 г/т), которые повышены в эндоконтактных зонах массива. В рудоносных метасоматитах и жилах, развитых и локализованных в апикальных частях массива выявлены весьма высокие концентрации никеля (2384-5585 г/т), кобальта (235-2200 г/т) и меди (87330-99000 г/т).

На мультиэлементной диаграмме (рис. 17) во всех типах пород Бельтауского габбро-перидотитового массива (включая базитовые дайки, метасоматиты и рудоносные жилы) наблюдаются минимумы по Rb, Th, Nb, Ta, Zr, W, Sb, Y и максимумы по Se, Te, As, Pb, Sc, которые свидетельствуют о едином источнике их расплавов. Содержания золота, серебра и сопутствующих им элементов (Se, Te, As, Bi) постепенно увеличивается от перидотитов к габброидам и их дериватам.

Спектр распределения РЗЭ в перидотитах, габброидах и их дериватах пологий с незначительным обогащением легкими РЗЭ (рис. 17). Самое низкое суммарное содержание иттрия и редких земель в перидотитах, их серпентинизированных разностях и троктолитах 15-23 г/т, габбро-нориты, титан-авгитовые, роговообманоковые габбро, лейкогаббро и анортозиты характеризуются средними содержаниями (50-100 г/т), максимально высокие определены в их дериватах – дайках диабазов (352 г/т) и габбро-диабазов (217 г/т).

Но спектры распределения РЗЭ во всех типах пород Бельтауского габбро-перидотитового массива четко коррелируются друг с другом, с небольшим обогащением в области легких редких земель.

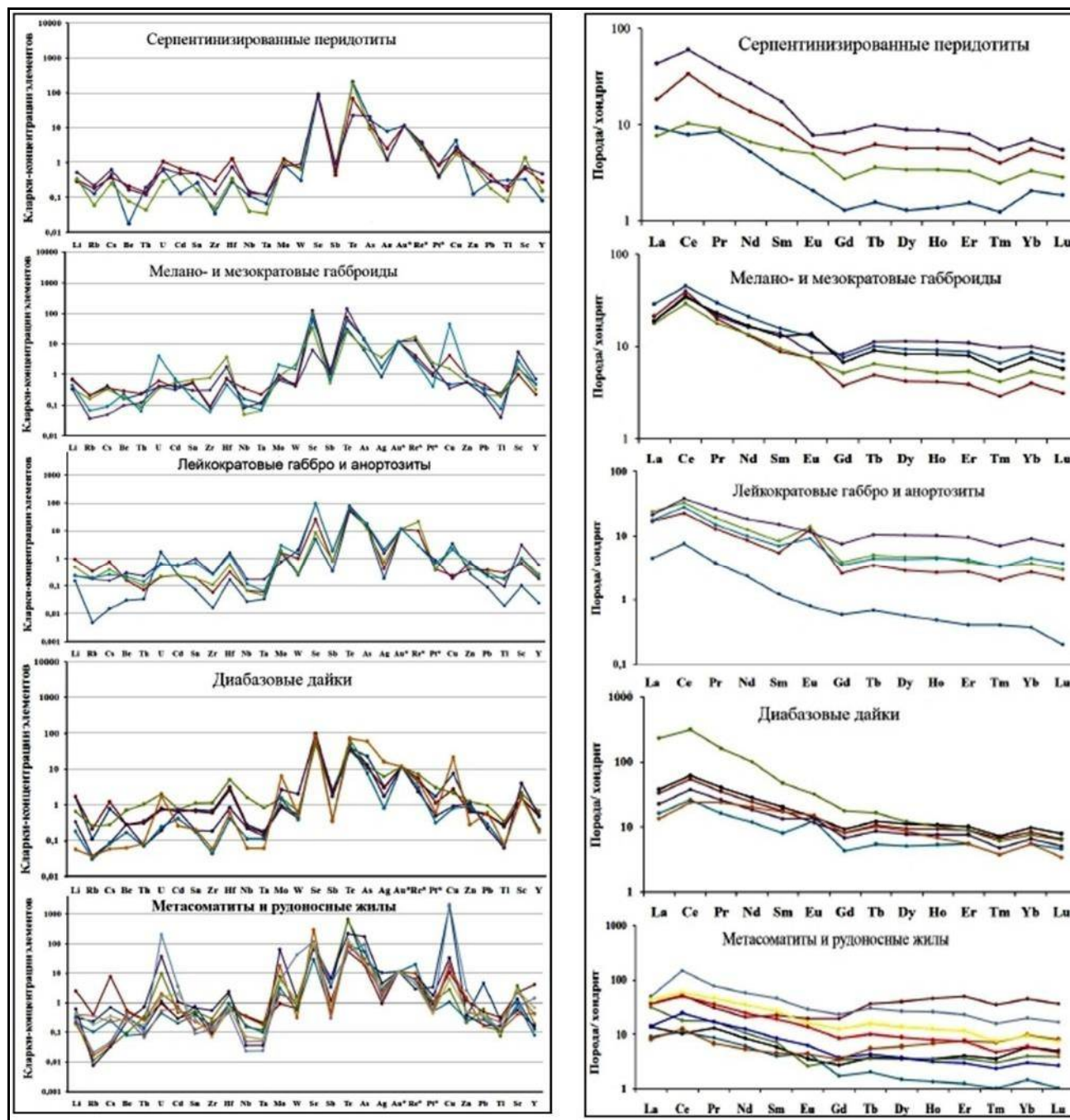


Рис. 17. Кларки-концентрации (левая колонка) и распределения элементов (правая колонка) в породах Бельтауского габбро-перидотитового массива и генетически связанных с ними метасоматитах и рудоносных жилах

В анортозитах наблюдается отрицательная европиевая аномалия, связанная, по всей видимости, с фракционированием плагиоклаза, когда в перидотитах, габброидах и их дериватах наблюдается явно положительная европиевая аномалия.

В настоящее время геодинамическая позиция пород Бельтауского габбро-перидотитового массива, установленная на

основе анализа его структурно-тектонического положения, морфологических и петрохимических особенностей, определяется как продукт магматизма активных окраин [40]. Однако на большинстве диаграмм либо полностью, либо значительной частью фигуративные точки занимают положение в поле известково-щелочной серии, что вносит некоторую неопределенность в диагностику

геодинамической природы и требует проведения дополнительных исследований по установлению мантийных источников пород массива.

Размещения точек пород Бельтауского габбро-перидотитового массива на петрогенетической дискриминационной диаграмме R_1 - R_2 указывают на принадлежность их к продуктам единого фракционированного (эволюционированного) мантийного магматического расплава (рис. 18).

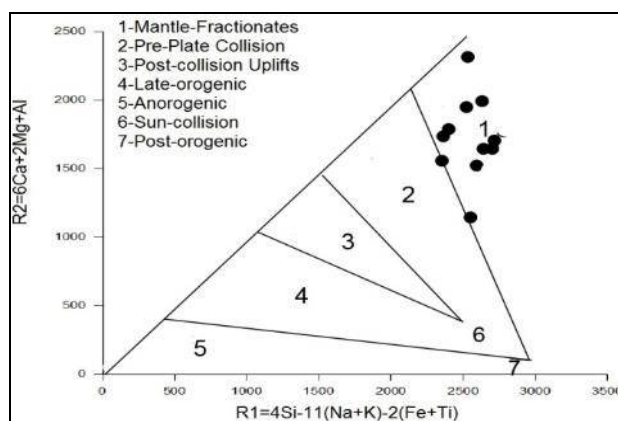


Рис. 18. Размещения пород Бельтауского габбро-перидотитового массива на дискриминационной диаграмме R_1 - R_2 [41]

В координатах диаграммы Ce/Nb – Th/Nb (рис. 19) большая часть составов лежит на линии смешения производных двух резервуаров: плюмового источника с участием рециклингового литосферного вещества – тугоплавкой составляющей погружившихся в мантию слэбов (RSC) и надсубдукционных компонентов (легкоподвижное вещество, мобилизуемое при дегидратации и плавлении слэбов – SDC), растягиваясь на поле базитов островных дуг Марианского типа.

6. Выводы

1. Для массива характерна слабая расслоенность, обусловленная дифференциацией первичной базальтовой магмы, продукты которой представлены отдельными горизонтами лерцолитов, троктолитов, оливиновых габбро, титанавгитовых габбро, габброноритов, габбропироксенитов и анортозитов. Она подтверждается асимметричным строением интрузивного массива, что согласуется с кумулятивной природой пород дифференциро-

ванной серии, для которой характерна последовательность кумулусных парагенезисов: $Ol+cPx+oPx\pm Pl$ (лерцолит), $Ol+Pl\pm Px$ (троктолит), $Pl+cPx+oPx\pm Ol$ (габбронорит, габбропироксенит), $Pl+cPx\pm Ol$ (габбро, оливиновое габбро, титанавгитовое габбро), $Pl\pm Px$ (анортозит). При этом анортозиты и безолиновые лейко- и мезократовые габброиды располагаются ближе к центральной части массива гипсометрически выше, чем меланократовые габброидов и перидотитов, а последние тяготеют к периферическим и более глубоким его частям.

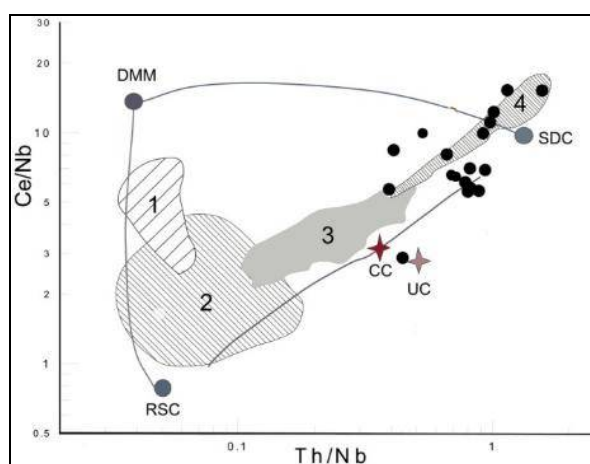


Рис. 19. Диаграмма Ce/Nb - Th/Nb [42] для пород Бельтауского габбро-перидотитового массива

Условные обозначения: составы геохимических резервуаров (DMM – деплетированная мантия, RSC – реститовый компонент слэбов, SDC – мобильный компонент слэбов) по [43], CC (средний состав коры) и UC (верхняя кора) – по [44]; поля составов: 1 – MORB, 2 – производные Исландского плюма, 3 – Сибирские траппы по [45], 4 – породы Марианской дуги по [42]; темные кружки – породы Бельтауского габбро-перидотитового массива.

2. Для богатых оливином пород массива (плагноклазосодержащие лерцолиты, троктолиты и оливиновые габбро) не вызывает сомнения интертеллурическая природа кристаллов оливина. Представляется, что оливин кристаллизовался в глубинном очаге и в дальнейшем гравитационно накапливался в придонной части магматической камеры, формируя слои перидотитов (лерцолитов).

По составу оливин из плагиоцерцолитов не отличается от оливинов из габброидов, в основном представлен хризотилом (Fo₇₄-Fo₇₉).

3. Впервые с применением микрозондового анализа пород Бельтауского массива выявлены формы находений и вещественные составы породообразующих, акцессорно-рудных минералов и рудогенерирующих флюидных микрообособлений. Определены главные минералы-носители и минералы-концентраторы железа, титана, меди, никеля и кобальта, хрома, платиноидов, золота, серебра, редких и редкоземельных металлов, служащие минералогическими критериями при поиске железо-титанового и медно-никелевого оруденения с благороднометалльной нагрузкой. Установлены микроминералы серебра: сульфат серебра в плагиоцерцолитах, силикат серебра в габбро-пироксенитах, палладистое серебро в диабазах, кремнещелочно-хлоридные микрообособления рудогенерирующих флюидов, содержащие примесей легких платиноидов, золота и серебра, а также карбонат серебра в анортозитах.

4. Геохимическая специализация перидотитов Бельтауского габбро-перидотитового массива характеризуется ярко выраженными

повышенными содержаниями никеля и кобальта, которые резко превышают содержания этих элементов, чем в мелано- и мезократовых габбро, лейкогаббро и анортозитах. Диабазовые дайки массива также характеризуются повышенными содержаниями этих элементов. Мелано- и мезократовые габброиды и их жильные дериваты являются относительно медоносными, чем остальные породы массива.

В рудоносных метасоматитах и жилах, развитых и локализованных в апикальных частях массива выявлены весьма высокие концентрации никеля (2384-5585 г/т), кобальта (235-2200 г/т) и меди (87330-99000 г/т).

5. Близость перидотитов, габброидов и их дериватов – диабазовых даек по химическому и микроэлементному составу к известково-щелочным гипербазитам и базитам, а также положение фигуративных точек на петрогенетических дискриминационных диаграммах, указывают на их мантийную природу. Все это даёт основание подтвердить вывод, относительно формирования пород Бельтауского габбро-перидотитового массива в условиях островодужного мантийного магматизма марианского типа.

Список литературы

1. Блюман Б.А. Офиолиты и кора океанов // Региональная геология и металлогения. 2016. № 68. С. 66-72.
2. Высоцкий С.В. Офиолитовые ассоциации островодужных систем Тихого океана. Владивосток: ДВО АН СССР. 1989. 196 с.
3. Высоцкий С.В. Офиолитовые и бонинит-офиолитовые ассоциации островодужных систем западной Пацифики: Автореф. дис... д-ра геол.-минер. наук. М.: МГУ. 1996. 62 с.
4. Высоцкий С.В., Голич А.Н. Петрология и минералогия офиолитов структур типа pull-apart (на примере трога Кайман) // Тихоокеанская геология. 2017. Т.36. №4. С. 38-51.
5. Добрецов Н.Л. Глаукофановый метаморфизм и три типа офиолитовых комплексов // Докл. АН СССР. 1974. Т. 216. № 6. С. 1383-1386.
6. Добрецов Н.Л. Конников Э.Г., Складарев Е.В., Медведев В.Н. Марианит-бонинитовая серия и эволюция офиолитового магматизма Восточного Саяна // Геология и геофизика. 1986. № 12. С. 29-35.
7. Дугарова Н. А., Тишин П. А., Гертнер И.

References

1. Blyuman B.A. *Ophiolity i kora okeanov* [Ophiolites and oceanic crust]. *Regional'naya geologiya i metallogeniya*, 2016, No 68, pp. 66-72. (In Russian)
2. Vysotskiy S.V. *Ofiolitoviye assotsiatsii ostrovoduzhnykh sistem Tikhogo okeana* [Ophiolite associations of island-arc systems of the Pacific Ocean]. Vladivostok, DVO AN SSSR. 1989. 196 p. (In Russian)
3. Vysotskiy S.V. *Ofiolitoviye i boninit-ofiolitoviye assotsiatsii ostrovoduzhnykh sistem zapadnoy Patsifiki*. Avtoreferat of Dis. Cand. Sci. Moscow, MGU. 1996. 62 p. (In Russian)
4. Vysotsky S.V., Golich A.N. Petrology and mineralogy of ophiolite structures of a pull-apart type by the example of the Kaiman trough. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2017, Vol. 11, No 4, pp. 38-51. (In Russian)
5. Dobretsov N.L. *Glaukofanoviy metamorfizm i tri tipa ofiolitovikh kompleksov* [Glaucophane metamorphism and three types of ophiolite complexes]. *Dokl. AN SSSR*, 1974, Vol. 216, No 6, pp. 1383-1386. (In Russian)
6. Dobretsov N.L., Konnikov E.G., Sklyarov E.V., Medvedev V.N. Marianite-boninite series and

Ф., Краснова Т. С. Минералогия и условия образования метабазитов офиолитовой ассоциации северного склона Кузнецкого Алатау // Литосфера. 2017. Т.17. № 4. С. 97-109.

8. Колман Р.Г. Офиолиты. М.: Мир. 1979. 262 с.

9. Мамарозиков У.Д. Петрология и минералого-геохимическая оценка перспектив рудоносности ультрабазитов и базитов Тескудук-Ченгельдинского массива (Тамдытау, Западный Тянь-Шань) // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. № 1. С. 161-183.

10. Паланджян С.А. Лерцолитовые массивы офиолитов Анадырско-Корякского региона: геологическое строение и состав пород как показатели обстановок формирования // Литосфера. 2010. № 5. С. 3-19.

11. Dilek Y., Furnes H. Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere // Geol. Soc. Amer. Bull., 2011. Vol.123. No3/4. P. 387-411.

12. Dilek Y., Robinson P.T. (eds). Ophiolites in Earth History // Geol. Soc. London. Spec. Publ. 2003. 218 p.

13. Паланджян С.А., Дмитренко Г.Г. Петрохимические типы и геотектоническая позиция перидотитов офиолитовых ассоциаций // Петрология гипербазитов и базитов / Отв. ред. Г.В.Поляков. Новосибирск: Наука. 1990. С. 52-70.

14. Furnes H., Safonova I. Ophiolites of the Central Asian Orogenic Belt: Geochemical and petrological characterization and tectonic settings // Geoscience Frontiers. 2019. No 10. P. 1255-1284.

15. Берзин С.В. Офиолиты мариинского комплекса в восточном и западном обрамлениях Ревдинского массива // Литосфера. 2016. №1. С. 88-106.

16. Складарев Е.В., Ковач В.П., Котов А.Б., Кузьмичев А.Б., Лавренчук А.В., Переляев В.И., Щипанский А.А. Бониниты и офиолиты: проблемы их соотношения и петрогенезиса бонинитов // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. №1. С. 163-180.

17. Ханчук А.И., Высоцкий С.В. Разноглубинные габбро-гипербазитовые ассоциации в офиолитах Сихотэ-Алиня (Дальний Восток России) // Геология и геофизика, 2016. Т. 57. №1. С. 181-198.

18. Borisova A., Ceuleneer G., Kamenetsky V.S. et al. A new view on the petrogenesis of the Oman ophiolite chromitites from microanalyses of chromite-hosted inclusions // Journal of Petrology. 2012. Vol. 52. № 12. P. 2411-2440.

evolution of ophiolite magmatism in the Eastern Sayan. *Russian Geology and Geophysics*, 1986, No 12, pp. 29-35. (In Russian)

7. Dugarova N.A., Tishin P.A., Gertner I.F., Krasnova T.S. Mineralogy and metabasites formation conditions from ophiolite association at northern slope of Kuznetsk Alatau. *Lithosphere (Russia)*, 2017, Vol. 17, No 4, pp. 97-109. (In Russian)

8. Coleman R.G. *Ophiolity* [Ophiolites]. Moscow, Mir. 1979. 262 p. (In Russian)

9. Mamrozikov U.D. Petrology and mineralogical-geochemical estimation of prospects of ore bearing of ultrabazites and basites of the Tescuduk-Cengeldi massif (Tamdytau, Western Tien Shan). *Nauchno-Tekhnicheskii Vestnik Bryanskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, 2020, No 1, pp. 161-183. (In Russian)

10. Palandzhyan S. A. Lherzolite massifs in the Anadyr-Koryak region ophiolites: Geological structure and rock composition as an indicator of the generation setting. *Lithosphere (Russia)*, 2010, No 5, pp. 3-109. (In Russian)

11. Dilek Y., Furnes H. Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 2011. Vol.123. No3/4. P. 387-411.

12. Dilek Y., Robinson P.T. (eds). Ophiolites in Earth History. *Geol. Soc. London. Spec. Publ.* 2003. 218 p.

13. Palandzhyan S.A., Dmitrenko G.G. *Petrokhimicheskiye tipy i geotektonicheskaya pozitsiya peridotitov ofiolitovykh assotsiatsiy* [Petrochemical types and geotectonic position of peridotites of ophiolite associations]. *Petrology of hyperbasites and basites*. Responsible editor G.V.Polyakov. Novosibirsk, Nauka. 1990, pp. 52-70. (In Russian)

14. Furnes H., Safonova I. Ophiolites of the Central Asian Orogenic Belt: Geochemical and petrological characterization and tectonic settings. *Geoscience Frontiers*, 2019, No 10, pp. 1255-1284.

15. Berzin S.V. Ophiolites of Mariinsky complex at east and west frames of Revdinsky Massif. *Lithosphere (Russia)*, 2016, No 1, pp. 88-106. (In Russian)

16. Sklyarov E.V., Kovach V.P., Kotov A.B., Kuzmichev A.B., Lavrenchuk A.V., Perelyaev V.I., and A.A. Shchipansky. Boninites and ophiolites: problems of their relations and petrogenesis of boninites. *Russian Geology and Geophysics*, 2016, Vol. 57, No 1, pp. 163-180. (In Russian)

17. Khanchuk A.I., Vysotskiy S.V. Different-depth gabbro-ultrabasic associations in the Sikhote-Alin ophiolites (Russian Far East). *Russian Geology and Geophysics*, 2016, Vol. 57, No 1, pp.

19. Riccardo Tribuzio, Matthew F. Thirlwall and Riccardo Vannucci. Origin of the Gabbro-Peridotite Association from the Northern Apennine Ophiolites (Italy) // *Precambrian Research*. 2016. Vol. 6. P.27-46.
20. Лихойдов Г.Г. Петролого-геохимические особенности основных и ультраосновных пород гор Кульджуктау. Автореф. дисс... канд. г.-м. наук. Ташкент, 1967. 21с.
21. Баранов В.В., Кромская К.М., Висьневский Я.С. Габброидные комплексы западной части Южного Тянь-Шаня и их минерогения. Ташкент: Фан. 1978. 168 с.
22. Баскаков Ю.Ф., Крылов Н.И. Бельтауский габброидный интрузив и связанная с ним эндогенная минерализация // В кн: Некоторые закономерности размещения эндогенного оруденения в Узбекистане. Ташкент: Фан. 1966. С. 78-84.
23. Шарафиев М.М. Петрография изверженных пород Бельтау (Кульджуктау) и некоторые вопросы генезиса Тасказганского месторождения графита. Автореф. дисс... канд. г.-м. наук. Ташкент. 1954. 24 с.
24. Каталог интрузивных массивов Узбекистана // Под ред. И.Х. Хамрабаева. Ташкент: Фан. 1975. Ч. II. 429 с.
25. Далимов Т.Н. Межрегиональная корреляция и основные проблемы палеозойского магматизма Западного Тянь-Шаня // Геология и минеральные ресурсы. 2011. № 1. С. 3-17.
26. Ахунджанов Р., Мамарозиков У.Д., Усманов А.И. Петрогенезис потенциально рудоносных интрузивов Узбекистана. Ташкент: Фан. 2014. 352 с.
27. Morimoto C. Nomenclature of pyroxene // *Mineral. Mag.* 1988. No 52. P. 535-550.
28. Вахрушев В.А. Рудные минералы изверженных и метаморфических пород. М.: Недра. 1989. 199 с.
29. Кузьмин А.М., Полуэктова Т.И. О значении акцессорных минералов для изучения магматических пород // Известия Томского политехнического института. 1971. Т. 177. С. 52-57.
30. Ляхович В.В., Родзянко Н.Г. Акцессорные минералы как индикаторы рудообразования. Ростов: Изд-во Ростовского университета. 1974. 255 с.
31. Хамрабаев И.Х. Петролого-геохимические критерии рудоносности магматических комплексов (на примере Узбекистана). Ташкент: Фан. 1969. 212 с.
32. Кромская К.М. Минералогия эндогенного никель-графитового месторождения Тасказган и геохимия отдельных элементов 181-198. (In Russian)
18. Borisova A., Ceuleneer G., Kamenetsky V.S. et al. A new view on the petrogenesis of the Oman ophiolite chromitites from microanalyses of chromite-hosted inclusions. *Journal of Petrology*. 2012, Vol. 52, No 1, pp. 2411-2440.
19. Riccardo Tribuzio, Matthew F. Thirlwall and Riccardo Vannucci. Origin of the Gabbro-Peridotite Association from the Northern Apennine Ophiolites (Italy). *Precambrian Research*, 2016, Vol. 6, pp.27-46.
20. Likhoydov G.G. Petrologo-geokhimicheskiye osobennosti osnovnykh i ultrasnovnykh porod gor Kuldzhuktau Avtoreferat of Dis. Cand. Sci. Tashkent, 1967. 21 p. (In Russian)
21. Baranov V.V., Kromskaya K.M., Vis'nevskiy Ya.S. *Gabbroidnyye komplekсы zapadnoy chasti Yuzhnogo Tyan'-Shanya i ikh minerageniya* [Gabbroid complexes of the western part of the Southern Tien Shan and their minerageny]. Tashkent, Fan. 1978. 168 p. (In Russian)
22. Baskakov YU.F., Krylov N.I. *Beltauskiy gabbroidnyy intruziv i svyazannaya s nim endogennaya mineralizatsiya* [Beltau gabbroic intrusion and associated endogenous mineralization]. In: Some patterns of distribution of endogenous mineralization in Uzbekistan. Tashkent, Fan. 1966. pp. 78-84. (In Russian)
23. Sharafiyev M.M. Petrografiya izverzhennykh porod Beltau (Kuldzhuktau) i nekotoryye voprosy genezisa Taskazganskogo mestorozhdeniya grafita. Avtoreferat of Dis. Cand. Sci. Tashkent, 1954. 24 p. (In Russian)
24. *Katalog intruzivnykh massivov Uzbekistana* [Catalogue of intrusive massifs of Uzbekistan]. Ed. by Khamrabaev I.Kh. Tashkent, Fan. 1975. Part II, 429 p. (In Russian)
25. Dalimov T.N. *Mezhregionalnaya korrel'yatsiya i osnovnyye problemy paleozoyskogo magmatizma Zapadnogo Tyan-Shanya* [Interregional correlation and main problems of Paleozoic magmatism of the Western Tien Shan]. *Geologiya i mineralnyye resursy*, 2011, No 1, pp. 3-17. (In Russian)
26. Akhundzhanov R., Mamarozikov U.D., Usmanov A.I. *Petrogenезis potentsialno rudononykh intruzivov Uzbekistana* [Petrogenesis of potentially ore-bearing intrusions of Uzbekistan]. Tashkent, Fan. 2014. 352 p. (In Russian)
27. Morimoto C. Nomenclature of pyroxene. *Mineral. Mag.*, 1988, No 52, pp. 535-550.
28. Vakhrushev V.A. *Rudnyye mineraly izverzhennykh i metamorficheskikh porod* [Ore minerals of igneous and metamorphic rocks]. Moscow, Nedra. 1989. 199 p. (In Russian)

//Автореф. дисс... канд. г.-м. наук. Ташкент. 1971. 27 с.

33. Дир, У.А., Хауи, Р.А., Зусман, Дж. Порообразующие минералы. Т. 3. М.: Мир, 1966. 318 с.

34. Disk H.J.B., Bullen Th. Cremian spine as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas // *Contrib. Mineral. Petrology*. 1984. № 31. P. 54-56.

35. Мурзин В.В., Дамдинов Б.Б., Азовскова О.Б., Дамдинова Л.Б. Геохимия углеродистых гипербазитов Оспинско-Китойского офиолитового массива (Восточные Саяны) // Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 160. 2013. С. 144-149.

36. Добрецов Н.Л., Шацкий А.Ф. Глубинный цикл углерода и глубинная геодинамика: роль ядра и карбонатитовых расплавов в нижней мантии // *Геология и геофизика*. 2012. №11. С. 1455-1475.

37. Жмодик С.М., Миронов А.Г., Жмодик А.С. Золотоконцентрирующие системы офиолитовых поясов (на примере Саяно-Байкало-Муйского пояса). Новосибирск: Изд-во «Гео». 2008. 304 с.

38. Herman van Roermund, Dirk Spengler, Hans Vrijmoed. Micro-diamond in orogenic peridotite and other high grade metamorphics of the northern UHP domain, WGR, Norway: When and how did they form? // 12th International Eclogite Conference in Are, Sweden, 2017. Post-conference excursion guide, 112 p.

39. Слодкевич В.В., Шафрановский Г.И. Алмазсодержащая минеральная ассоциация газовой-флюидного генезиса в Бельтауском расщелинном плутоне (Узбекистан) // *Минералогические флюиды и рудогенез / Мат-лы междунар. симпози. (совместно с APIFIS - II)*. Ташкент: ИГиГ АН РУз. 1998. С. 45-46.

40. Далимов Т.Н., Ганиев И.Н. Эволюция и типы магматизма Западного Тянь-Шаня. Ташкент: Университет. 2010. 226 с.

41. Batchelor, R. A. & Bowden, P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. *Chemical Geology*. 1985. Vol. 48. P. 43-55.

42. Мартынов Ю. А. Основы магматической геохимии. Владивосток: Дальнаука. 2010. 228 с.

43. Сасим С.А., Дриль С.И., Татарников С.А., Владимирова Т.А., Сандимирова Г.П. Геохимия и Sr-Nd-Pb изотопная систематика пород Акатуевского массива (юго-восточное Забайкалье) // Мат.-лы между. конф. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2008. С. 342-344

44. Щипанский А.А. и др. Геодинамика восточной окраины Сарматии в палеопротерозое //

29. Kuzmin A.M., Poluektova T.I. O znachenii aktsessornykh mineralov dlya izucheniya magmaticheskikh porod [On the importance of accessory minerals for the study of igneous rocks]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta*, 1971. Vol. 177, pp. 52-57. (In Russian)

30. Lyakhovich V.V., Rodzyanko N.G. *Aktsessornyye mineraly kak indikatory rudooobrazovaniya* [Accessory minerals as indicators of ore formation]. Rostov, Izd-vo Rostovskogo universiteta. 1974. 255 p. (In Russian)

31. Khamrabaev I.Kh. *Petrologo-geokhimicheskiye kriterii rudonosnosti magmaticheskikh kompleksov* [Petrological and geochemical criteria for ore bearing igneous complexes]. Tashkent, Fan, 1969. 214 p. (In Russian)

32. Kromskaya K.M. Mineralogiya endogenogo nikel-grafitovogo mestorozhdeniya Taskazgan i geokhimiya otdelnykh elementov. Avtoreferat of Dis. Cand. Sci. Tashkent, 1971. 27 p. (In Russian)

33. Dir, U.A., Khaui, R.A., Zusman, Dzh. *Porodo-obrazuyushchiye mineraly* [Rock-forming minerals]. Third Edition. Moscow: Mir, 1966. 318 p. (In Russian)

34. Disk H.J.B., Bullen Th. Cremian spine as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. *Contrib. Mineral. Petrology*, 1984, No 5, pp. 54-56.

35. Murzin V.V., Damdinov B.B., Azovskova O.B., Damdinova L.B. *Geokhimiya uglerodistykh giperbazitov Ospinsko-Kitoyskogo ofiolitovogo massiva (Vostochnyye Sayany)* [Geochemistry of carbonaceous hyperbasites of the Ospinsko-Kitoi ophiolite massif (Eastern Sayan)]. Proceedings of the IGG UB RAS, 2013, Issue 160, pp. 144-149. (In Russian)

36. Dobretsov N.L. and Shatskiy A.F. Deep carbon cycle and geodynamics: the role of the core and carbonatite melts in the lower mantle. *Russian Geology and Geophysics*, 2012, No 11, pp. 1455-1475. (In Russian)

37. Zhmodik S.M., Mironov A.G., Zhmodik A.S. *Zoloto-kontsentriruyushchiye sistemy ofiolitovykh poyasov (na primere Sayano-Baykalo-Muyskogo poyasa)* [Gold-concentrating systems of ophiolite belts (using the Sayan-Baikal-Muya belt as an example)]. Novosibirsk, Geo Publishing House. 2008. 304 p. (In Russian)

38. Herman van Roermund, Dirk Spengler, Hans Vrijmoed. Micro-diamond in orogenic peridotite and other high grade metamorphics of the northern UHP domain, WGR, Norway: When and how did they form? // 12th International Eclogite Conference in Are, Sweden, 2017. Post-conference

Геотектоника. 2007. № 1. С. 43-70.

45. Ненахов В. М., Бондоренко С.В. Тектоническая эволюция Лосевской шовной зоны Воронежского кристаллического массива в палеопротерозое // Геотектоника. 2011. № 4. С. 43-59.

excursion guide, 112 p.

39. Slodkevich V.V., Shafranovskiy G.I. *Almazoderzhashchaya mineralnaya assotsiatsiya gazovo-flyuidnogo genezisa v Beltauskom rassloyennom plutone (Uzbekistan)*. [Diamond-bearing mineral association of gas-fluid genesis in the Beltau layered pluton (Uzbekistan)]. *Mineral-forming fluids and ore genesis. Proc. int. symposium (jointly with APIFIS - II)*. Tashkent. IGI AN Ruz, 1998, pp. 45-46. (In Russian)

40. Dalimov T.N., Ganiyev I.N. *Evolitsiya i tipy magmatizma Zapadnogo Tyan-Shanya* [Evolution and types of magmatism of the Western Tien Shan]. Tashkent, Universitet. 2010. 226 p. (In Russian)

41. Batchelor, R. A. & Bowden, P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. *Chemical Geology*, 1985, Vol. 48, pp. 43-55.

42. Martynov Yu. A. *Osnovy magmaticheskoy geokhimii* [Fundamentals of magmatic geochemistry]. Vladivostok, Dalnauka. 2010. 228 p. (In Russian)

43. Sasim S.A., Dril S.I., Tatarnikov S.A., Vladimirova T.A., Sandimirova G.P. Geochemistry and Sr-Nd-Pb isotope systematics of rocks of the Akatuevsky massif (southeastern Transbaikalia). *Proceedings of the international conference*. Ulan-Ude, Publishing house of the BSC SB RAS, 2008, pp. 342-344. (In Russian)

44. Shchipanskiy A.A. i dr. *Geodinamika vostochnoy okrainy Sarmatii v paleoproterozoye* [Geodynamics of the eastern margin of Sarmatia in the Paleo-Proterozoic]. *Geotektonika*, 2007, No 1, pp. 43-70. (In Russian)

45. Nenakhov V. M., Bondorenko S.V. *Tektonicheskaya evolyutsiya Losevskoy shovnoy zony Voronezhskogo kristallicheskogo massiva v paleoproterozoye* [Tectonic evolution of the Losevskaya suture zone of the Voronezh crystalline massif in the Paleoproterozoic]. *Geotektonika*, 2011, No 4, pp. 43-59. (In Russian)

Сетевое издание
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Брянского государственного университета

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского».

**Свидетельство о регистрации средства массовой информации
выдано Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
Эл № ФС77-62798 от 18 августа 2015 г.**

Главный редактор сетевого издания:
доктор технических наук, профессор
А.В. Лагереv

Адрес учредителя:
ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет
имени академика И.Г. Петровского»
241036, Россия, Брянск, ул. Бежицкая, д. 14

Адрес редакции и издателя:
РИСО ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет
имени академика И.Г. Петровского»
241036, Россия, Брянск, ул. Бежицкая, д. 20

Дата размещения сетевого издания в сети Интернет
на официальном сайте <http://www.ntv-brgu.ru> 25.09.2025 г.

16+