

№21 (2)

ISSN 2307-0048

Resources and Technology

научный журнал

2024

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Resources and Technology

№21 (2)

Сетевое издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 - 57768 от 18.04.2014.

Учредитель – ФГБОУ ВО Петрозаводский государственный университет.

Адрес электронной почты журнала: rt@petrsu.ru. Номер телефона: 8 (8142) 76-97-11.

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

Resources and Technology

№21 (2)

Mass media registration certificate #ΦC77-57768 (18/04/2014).

Founder: Petrozavodsk State University.

E-mail: rt@petsu.ru. Phone number: 8 (8142) 76-97-11.

Редакционная коллегия:

Главный редактор:

Васильев Сергей Борисович (Россия) доктор технических наук, профессор, *servas@psu.karelia.ru*.

Заместитель главного редактора:

Колесников Геннадий Николаевич (Россия) доктор технических наук, профессор, *kgn@psu.karelia.ru*.

Тихонов Евгений Андриянович (Россия) кандидат технических наук, доцент, *tihonov@psu.karelia.ru*.

Редакционный совет:

Гаврилова Ольга Ивановна (Россия) доктор сельскохозяйственных наук, профессор, *ogavril@mail.ru*.

Добрынина Оксана Леонидовна (Россия) Кандидат педагогических наук, доцент, *oksdobr@mail.ru*.

Григорьев Игорь Владиславович (Россия) Доктор технических наук, профессор, *silver73@inbox.ru*.

Карвинен Сари (Финляндия) Магистр естественных наук, *sari.karvinen@metla.fi*.

Левин Валерий Михайлович (Мексика) Доктор физико-математических наук, профессор,
vlevine@imp.mx.

Ледницкий Андрей Викентьевич (Республика Беларусь) Кандидат экономических наук, доцент,
ledniz@inbox.ru.

Мануковский Андрей Юрьевич (Россия) Доктор технических наук, профессор, *mayu1964@mail.ru*.

Мельник Пётр Григорьевич (Россия) Кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, *melnik_petr@bk.ru*.

Саастамойнен Олли (Финляндия) Доктор наук, *olli.saastamoinen@uef.fi*.

Саливоник Александр Владимирович (Россия) Кандидат технических наук, *salivonik@rambler.ru*.

Сюнёв Владимир Сергеевич (Россия) Доктор технических наук, профессор, *siounev@psu.karelia.ru*.

Editorial staff:

Editor-in-chief:

Prof. Dr. Vasilyev, Sergey (Russia), *servas@psu.karelia.ru*.

Deputy editor:

Prof. Dr. Kolesnikov, Gennady (Russia), *kgn@psu.karelia.ru*.

Prof. Dr. Tikhonov, Eugeny (Russia), *tihonov@psu.karelia.ru*.

Editorial board:

Prof. Dr. Gavrilova, Olga I. (Russia), *ogavril@mail.ru*.

Dr. Dobrinina, Oksana (Russia), *oksdobr@mail.ru*.

Prof. Dr. Grigoryev, Igor (Russia), *silver73@inbox.ru*.

M. Sc. Karvinen, Sari (Finland), *sari.karvinen@metla.fi*.

Prof. Dr. Levin, Valery (Mexico), *vlevine@imp.mx*.

Prof. Dr. Lednitskij, Andrej (Belarus), *ledniz@inbox.ru*.

Prof. Dr. Manukovsky, Andrey (Russia), *mayu1964@mail.ru*.

Dr. Melnik, Petr (Russia), *melnik_petr@bk.ru*.

Prof. Emeritus, Dr. Sc., Saastamoinen Olli (Finland), *olli.saastamoinen@uef.fi*.

Prof. Dr. Salivonik, Alexander (Russia), *salivonik@rambler.ru*.

Prof. Dr. Syunev, Vladimir (Russia), *siounev@psu.karelia.ru*.

Содержание №2, Т. 21, 2024

Чудинов С. А.	Исследование набора прочности фиброцементогрунта в дорожной одежде лесовозной автомобильной дороги	1 - 14
Васильев В. В.	Автоматизация планирования первоначального сплава лесоматериалов в плоских сплотовых единицах	15 - 31
Абалихин А. М., Барабанов Д. В., Крупин А. В., Муханов Н. В.	Испытания центробежного измельчителя фуражного зерна	32 - 50
Куницкая О. А., Кривошеев А. А., Швецов А. С., Григорьева О. И., Макуев В. А., Ревяко С. И.	Технологический анализ вариантов использования валочно-трелёвочно-процессорных машин	51 - 82
Зимарин С. В., Четверикова И. В., Хрипченко М. С.	Многоцелевая оптимизация параметров комбинированного корпуса плуга	83 - 101
Жачкин С. Ю., Козлов В. Г., Трифонов Г. И., Сидоркин О. А.	Повышение износостойкости муфты сцепления композиционным гальваническим хромированием	102 - 113
Мохирев А. П., Серватинский В. В., Дудин П. О., Сорокина М. Н., Мохирев И. А., Соколова А. Р.	Анализ факторов, влияющих на несущую способность автомобильной дороги с покрытием капитального типа	114 - 128

Content №2, Vol. 21, 2024

<i>Chudinov S. A.</i>	Study of the Strength Gain of Fiber Cement-modified Soil in the Logging Road Pavement	1 - 14
<i>Vasiliev V. V.</i>	Automation of planning of the initial timber floating in flat raft sections	15 - 31
<i>Abalikhin A., Barabanov D., Krupin A., Mukhanov N.</i>	Testing of a feed grain centrifugal shredder	32 - 50
<i>Kunickaya O., Krivosheev A., Shvetsov A., Grigoreva O., Makuev V., Revyako S.</i>	Technological analysis of felling-skidding-processing machines usage	51 - 82
<i>Zimarin S., Chetverikova I., Khripchenko M.</i>	Multi-purpose optimization of parameters of the plow combined body	83 - 101
<i>Zhachkin S., Kozlov V., Trifonov G., Sidorkin O.</i>	Improving the wear resistance of the clutch by composite galvanic chrome plating Clutch wear resistance enhancement by composite galvanic chrome plating	102 - 113
<i>Mokhirev A. P., Servatinsky V. V., Dudin P., Sorokina M., Mokhirev I., Sokolova A.</i>	Analysis of factors affecting the bearing capacity of a principal-type paved highway	114 - 128

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7443

УДК 624.138.232

Статья

Исследование набора прочности фиброцементогрунта в дорожной одежде лесовозной автомобильной дороги

Чудинов Сергей Александрович

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автомобильных дорог, мостов и тоннелей Уральского государственного лесотехнического университета (Российская Федерация), chudinovsa@m.usfeu.ru

Получена: 8 октября 2023 / Принята: 4 апреля 2024 / Опубликовано: 12 апреля 2024

Аннотация: Одним из ключевых факторов развития лесопромышленного комплекса России является увеличение доступных лесосырьевых ресурсов, которое должно обеспечиваться постоянным расширением сети и повышением качества лесовозных автомобильных дорог. Многолесные районы, как правило, значительно удалены от мест добычи и производства традиционно используемых дорожно-строительных материалов: песка, щебня, гравия, щебёночно-песчаных смесей, что приводит к росту затрат на их транспортировку и стоимости строительства лесовозных автомобильных дорог в целом. В данных условиях является эффективным использование технологии укреплённых местных грунтов для строительства лесовозных автомобильных дорог, обеспечивающей высокое качество и долговечность дорожной одежды при снижении стоимости строительно-монтажных работ. Учитывая высокие транспортные нагрузки и распространённые в лесной зоне слабые глинистые грунты в основании земляного полотна, целесообразно применение фиброцементогрунта для устройства слоёв дорожных одежд. Благодаря дисперсному армированию цементогрунтовой матрицы материала, распределённой по всему его объёму фибры, фиброцементогрунт имеет более высокие прочностные показатели, морозостойкость и трещиностойкость конструкции дорожной одежды по сравнению с цементогрунтом. Процесс структурообразования фиброцементогрунта проходит при взаимодействии цементного камня и фибры, поэтому исследование динамики набора прочности данного материала является актуальным. Проведены лабораторные исследования физико-механических показателей при 7, 28 и 56 сутках набора прочности фиброцементогрунта. Также проведены опытно-производственные исследования динамики увеличения модуля упругости фиброцементогрунтового

покрытия дорожной одежды на опытном участке лесовозной автомобильной дороги. На основе полученных результатов исследований прочности на сжатие, прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунтовых образцов установлено влияние добавки фибры на процесс структурообразования и динамику набора прочности материала. При строительстве опытного участка лесовозной автомобильной дороги доказана техническая и технологическая возможность устройства фиброцементогрунтовых слоёв конструкций лесовозных автомобильных дорог. Установлена зависимость фактических показателей модуля упругости фиброцементогрунтового покрытия от времени набора прочности материала, а также минимальный временной период, необходимый для достижения расчётного модуля упругости конструкции дорожной одежды лесовозной автомобильной дороги. Устройство фиброцементогрунтовых слоёв дорожных одежд требует использования минимального набора дорожно-строительной техники и количества привозных дорожно-строительных материалов, что существенно снижает стоимость строительно-монтажных работ, а также, благодаря длительному сроку службы дорожных одежд, — затраты на эксплуатацию лесовозных автомобильных дорог.

Ключевые слова: фиброцементогрунт; лесовозная дорога; дорожная одежда; модуль упругости; структурообразование; дисперсное армирование

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7443

Article

Study of the Strength Gain of Fiber Cement-modified Soil in the Logging Road Pavement

Sergey Chudinov

Ph. D. in engineering, associate professor, Head of Department of Highways, Bridges and Tunnels, Ural State Forest Engineering University (Russian Federation), chudinovsa@m.usfeu.ru

Received: 8 October 2023 / Accepted: 4 April 2024 / Published: 12 April 2024

Abstract: One of the key factors in the development of the Russian timber industry is the increase in available timber resources, which should be ensured by the constant expansion of the network and improvement of the quality of timber roads. Well forested areas, as a rule, are significantly removed from the places of extraction and production of traditionally used road-building materials: sand, crushed stone, gravel, crushed stone-sand mixtures, which leads to an increase in the cost of their transportation and the cost of constructing logging roads in general. In these conditions, it is effective to use the technology of strengthened local soils for the construction of logging roads, which ensures high quality and durability of road pavement while reducing the cost of construction and installation work. Considering the high transport loads and weak clay soils at the base of the roadbed that are common in the forest zone, it is advisable to use fiber cement-modified soil for constructing layers of road pavements. On account to the dispersed reinforcement of the cement-soil matrix of the material with fiber distributed throughout its volume, the fiber-cement soil has higher strength indicators, frost resistance and crack resistance of the road pavement structure compared to cement-modified soil. The process of structure formation of fiber cement soil occurs through the interaction of cement stone and fiber, so the study of the dynamics of this material strength gain is relevant. Laboratory studies of physical and mechanical parameters were conducted at 7, 28 and 56 days of strengthening of fiber cement soil. Also, pilot production studies were conducted on the dynamics of increasing the elasticity modulus of fiber cement soil pavement on a trial pavement section of a logging highway. Based on the results obtained from studies of compressive strength and tensile strength during splitting of fiber-cement soil samples, the influence of fiber admixture on the process of structure formation and on the dynamics of the material strength gain was established. During the construction of a trial pavement section of a logging highway, the technical and technological feasibility of fiber cement-soil layers establishment in logging

highway pavement structures was proven. The dependence of the actual elastic modulus of the fiber cement-soil pavement on the time of material strength gain, as well as the minimum time period required to achieve the calculated elastic modulus of the road pavement structure of a timber highway, has been traced. The construction of fiber cement-soil layers of road pavements requires a minimum set of road construction equipment and the amount of imported road construction materials, thus significantly reducing the cost of construction and installation work, and also, due to the long service life of road pavements, the cost of logging roads maintenance.

Keywords: fiber cement soil; logging road; road pavement; elastic modulus; structure formation; dispersed reinforcement

1. Введение

Развитие отечественного лесопромышленного комплекса неразрывно связано с совершенствованием транспортной инфраструктуры, в т. ч. с повышением качества и протяжённости сети лесовозных автомобильных дорог. Сложные условия лесной зоны: преобладание слабых грунтов, значительное удаление от мест производства и поставки дорожно-строительных инертных материалов (песка, щебня, гравия, щебёночно-песчаных смесей), а также высокие транспортные нагрузки от грузовой техники по перевозке лесоматериалов требуют поиска эффективных технологий, которые позволят осуществлять строительство лесовозных автомобильных дорог с высоким качеством и низкой стоимостью строительно-монтажных работ. Одной из таких технологий является устройство конструктивных слоёв дорожных одежд из укреплённых грунтов [1—3].

Традиционно используемым вяжущим материалом для укрепления грунтов является портландцемент [4]. Цементогрунты обладают высокими прочностными показателями и морозостойкостью, однако в условиях слабых грунтов в основании земляного полотна и при высоких нагрузках от грузовой техники данный материал имеет недостаточную трещиностойкость [5], [6]. Для повышения прочностных, транспортно-эксплуатационных показателей и срока службы цементогрунтовых слоёв конструкций лесовозных автомобильных дорог в практике дорожного строительства применяются различные активные добавки, вводимые в состав цементогрунтовых смесей [7—11]. Современным эффективным решением задачи повышения качества цементогрунтовых слоёв конструкций лесовозных автомобильных дорог является введение в состав цементогрунтовой смеси добавки фибры. Распределённая в объёме цементогрунтовой матрицы фибра дисперсно армирует материал, воспринимая за счёт осевого растяжения внешние нагрузки, и существенно повышает трещиностойкость и прочностные показатели фиброцементогрунтов [12].

В фиброцементогрунтах может использоваться фибра на основе базальтового, стеклянного, полипропиленового или углеродного волокна. Волокна фибры, закреплённые внутри кристаллической цементогрунтовой структуры, создают единый композиционный каркас, эффективно воспринимающий внешние нагрузки. Для приготовления фиброцементогрунтов с заданными физико-механическими характеристиками требуется соблюдение оптимальных дозировок компонентов смеси: грунта, портландцемента, фибры и воды. Подобранный оптимальный состав фиброцементогрунтовой смеси обеспечивает требуемые прочностные показатели и морозостойкость, а также трещиностойкость материала.

Высокие физико-механические показатели фиброцементогрунтов обусловлены прочной композиционной кристаллической фиброцементогрунтовой структурой. Процесс формирования такой структуры происходит во времени в условиях гидратации и гидролиза портландцемента при взаимодействии с частицами грунта и фибры. Поэтому исследование

процессов структурообразования по динамике набора прочности фиброцементогрунтов в лабораторных условиях и на экспериментальном участке лесовозной автомобильной дороги является актуальным.

Целью работы является исследование в лабораторных условиях прочностных показателей при разных сроках твердения фиброцементогрунтовых образцов, а также модуля упругости фиброцементогрунтового покрытия лесовозной автомобильной дороги на разных сроках набора прочности в реальных условиях.

2. Материалы и методы

Для проведения лабораторных исследований динамики изменения прочности на сжатие и прочности на растяжение при раскалывании образцов при 7, 28 и 56 сутках твердения были приготовлены различные составы фиброцементогрунтовых смесей с различным содержанием фибры. В качестве фибры использовались базальтовые волокна на основе отходов производства теплоизоляционных плит «Тизол» в г. Нижняя Тура (Свердловская область).

Производство базальтовых теплоизоляционных плит ведётся на основе сырья из горных пород базальтовой группы, которые подвергаются расплавлению и получению базальтовых волокон, из которых проводят формование минераловатных изделий. В процессе производства образуются отходы в виде базальтовых волокон, которые можно применять для приготовления фиброцементогрунтовых смесей, поскольку они имеют высокую прочность на растяжение, химическую стойкость и устойчивость к высоким температурам.

Фиброцементогрунтовая смесь была приготовлена на основе природного грунта — суглинка тяжёлого песчанистого (таблица 1), отобранного на лесовозной автомобильной дороге на территории ГКУ Свердловской области «Карпинское лесничество», обслуживаемой ООО «ОУС Леском». Также в состав фиброцементогрунтовой смеси входили портландцемент ЦЕМ II/В-И 32,5Б по ГОСТ 31108-2020 и вода по ГОСТ 51232-98.

Таблица 1. Характеристика природного грунта

Table 1. Characteristics of natural soil

Наименование грунта	Удельный вес грунта, т/м ³	Влажность на границе текучести, % по массе	Влажность на границе раскатывания, % по массе	Число пластичности	Оптимальная влажность, % по массе	pH грунта	Содержание гумусовых веществ
Суглинок тяжёлый песчанистый	1,48	26	13	13	15	6,5	1,8

Для проведения исследований были подготовлены следующие составы укрепленного грунта, отличающиеся количественным содержанием фибры (таблица 2). Изготовление фиброцементогрунтовых образцов и лабораторные исследования прочностных показателей проведены в соответствии с ГОСТ Р 70452-2022 в условиях полного водонасыщения.

Таблица 2. Составы укрепленного грунта

Table 2. Strengthened soil compositions

Компоненты состава, % от массы сухого грунта	Составы укрепленного грунта		
	№ 1	№ 2	№ 3
Портландцемент ЦЕМ II/В-И 32,5Б	8,0	8,0	8,0
Фиброволокно: базальтовое (отход производства базальтовых теплоизоляционных плит)	0	3,5	7,0
Вода	15,0	15,0	15,0

В целях проведения натурных опытно-экспериментальных исследований по определению показателя модуля упругости фиброцементогрунтового покрытия дорожной одежды переходного типа в августе 2023 г. был построен опытный участок на лесовозной автомобильной дороге на территории ГКУ Свердловской области «Карпинское лесничество», обслуживаемой ООО «ОУС Леском».

Дорожная одежда на опытном участке представляла собой однослойную конструкцию из фиброцементогрунтового слоя толщиной 0,25 м, уложенного на естественный грунт земляного полотна из суглинка тяжёлого песчанистого, характеристики которого представлены в таблице 1. Марка по прочности цементогрунта и фиброцементогрунта подобранных оптимальных составов № 1 и № 2 (см. таблицу 2) соответствовала марке М40 А. Фиброцементогрунтовая смесь была изготовлена на основе местного грунта — суглинка тяжёлого песчанистого (см. таблицу 1) и компонентов: фибры на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит «Тизол», портландцемента ЦЕМ II/В-И 32,5Б по ГОСТ 31108-2020 и воды по ГОСТ 51232-98. Работы по устройству фиброцементогрунтового покрытия проводились в порядке, представленном в таблице 3.

Модуль упругости при динамическом нагружении фиброцементогрунтового покрытия дорожной одежды определялся через 7, 28 и 56 суток набора прочности при помощи прибора ПДУ-МГ4. Для установления теоретических значений модуля упругости конструкции дорожной одежды на построенном участке лесовозной автомобильной дороги был произведён расчёт прочности в программном комплексе «Кредо Радон 4.2» в соответствии с ПНСТ 542-2021. На основе проведённого расчёта теоретическое значение модуля упругости конструкции дорожной одежды на опытном участке лесовозной автомобильной дороги со слоем покрытия из укрепленного грунта составило 92 МПа.

Таблица 3. Технологическая последовательность устройства фиброцементогрунтового покрытия дорожной одежды

Table 3. Technological sequence of installation of fiber cement soil pavement pavement

№ операции	Операции технологического процесса
1	Размельчение грунта прицепным ресайклером за 2 прохода по одному следу
2	Распределение портландцемента на поверхность грунта
3	Смешение портландцемента с грунтом прицепным ресайклером за 1 проход по одному следу
4	Распределение базальтового фиброволокна на поверхность цементогрунтовой смеси
5	Смешение базальтового фиброволокна с грунтом прицепным ресайклером с внесением воды до оптимальной влажности фиброцементогрунтовой смеси за 1 проход по одному следу
6	Предварительная подкатка основания катком на пневматических шинах за 2 прохода
7	Профилирование проезжей части автогрейдером
8	Окончательное уплотнение проезжей части катком на пневматических шинах за 13 проходов по одному следу
9	Уход за укрепленным грунтом путём нанесения на его поверхность слоя битумной эмульсии и ограничения движения транспорта в течение 7 суток

3. Результаты

На основании результатов проведённых исследований динамики изменения прочности при сжатии в зависимости от времени твердения фиброцементогрунтовых образцов, при оптимальном содержании добавки базальтового фиброволокна в количестве 3,5 % от массы сухого грунта через 7 суток прочность при сжатии составила 3,6 МПа, что на 11,1 % выше прочности при сжатии цементогрунтовых образцов без добавки фибры. Через 28 суток прочность при сжатии фиброцементогрунтовых образцов составила 5,27 МПа, что на 15,6 % выше прочности при сжатии цементогрунтовых образцов без добавки фибры. Через 56 суток прочность при сжатии фиброцементогрунтовых образцов составила 5,56 МПа, что на 16,1 % выше прочности при сжатии цементогрунтовых образцов без добавки фибры (рисунок 1).

Сравнительный анализ результатов динамики изменения прочности при сжатии в зависимости от времени набора прочности фиброцементогрунтовых образцов при содержании добавки базальтового фиброволокна в количестве 7,0 % от массы сухого грунта показал более низкую прочность — от 4,2 до 5,9 % по сравнению с фиброцементогрунтом с добавкой базальтового фиброволокна в количестве 3,5 % от массы сухого грунта в пределах всего рассматриваемого периода набора прочности до 56 суток (рисунок 2).

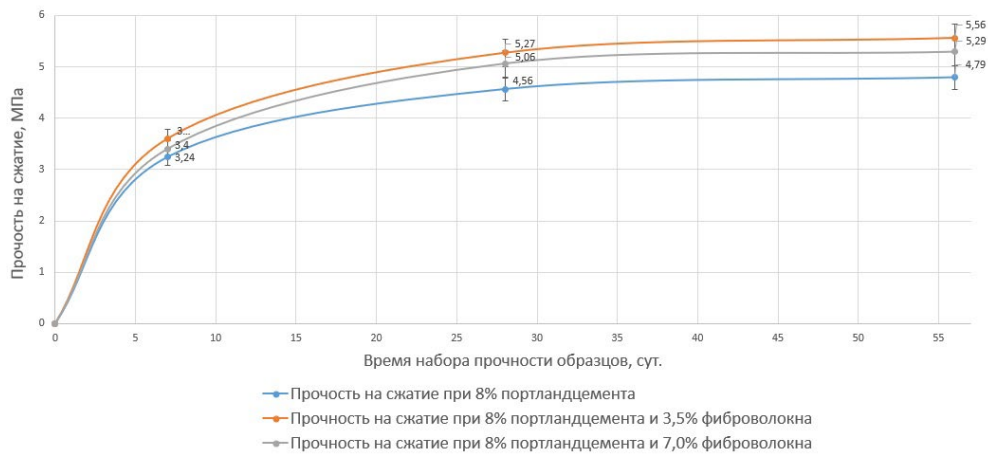


Рисунок 1. Изменение прочности на сжатие в зависимости от времени твердения образцов

Figure 1. Change in compressive strength depending on the hardening time of samples

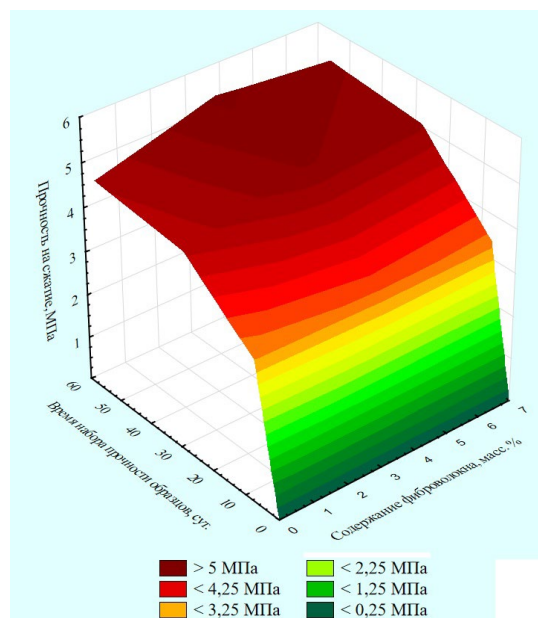


Рисунок 2. Поверхность отклика прочности на сжатие в зависимости от содержания фиброволокна и времени набора прочности фиброцементогрунта

Figure 2. Surface response of compressive strength depending on the fiber content and time of strengthening of fiber cement soil

Исследование динамики изменения прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от времени набора прочности фиброцементогрунтовых образцов также показало, что при оптимальном содержании добавки базальтового фиброволокна в количестве 3,5 % от массы сухого грунта через 7 суток прочность на растяжение

при раскалывании составила 0,78 МПа, что на 16,4 % выше прочности на растяжение при раскалывании цементогрунтовых образцов без добавки фибры. Через 28 суток прочность на растяжение при раскалывании фиброцементогрунтовых образцов составила 1,13 МПа, что на 18,9 % выше прочности на растяжение при раскалывании цементогрунтовых образцов без добавки фибры. Через 56 суток прочность на растяжение при раскалывании фиброцементогрунтовых образцов составила 1,20 МПа, что на 20,0 % выше прочности на растяжение при раскалывании цементогрунтовых образцов без добавки фибры (рисунок 3).

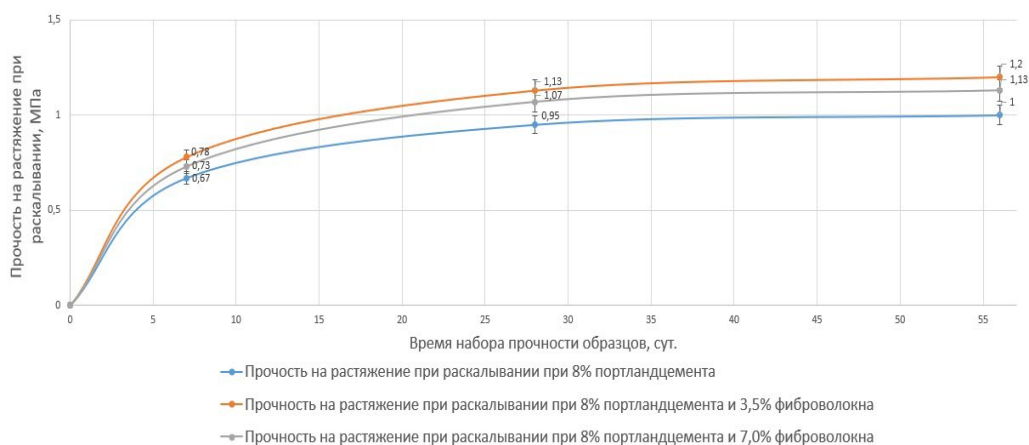


Рисунок 3. Изменение прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от времени твердения образцов

Figure 3. Change in tensile strength during splitting depending on the hardening time of samples

Показатель прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от времени набора прочности фиброцементогрунтовых образцов при содержании добавки базальтового фиброволокна в количестве 7,0 % от массы сухого грунта показал более низкую прочность — от 5,6 до 6,8 % по сравнению с фиброцементогрунтом с добавкой базальтового фиброволокна в количестве 3,5 % от массы сухого грунта в пределах всего рассматриваемого периода набора прочности до 56 суток (рисунок 4).

На основе результатов проведённых исследований изменения модуля упругости дорожной одежды лесовозной автомобильной дороги с фиброцементогрунтовым покрытием при содержании добавки базальтового фиброволокна в количестве 3,5 % от массы сухого грунта через 7 суток твердения модуль упругости составил 98 МПа, что на 6,5 % выше расчётного значения модуля упругости. Через 28 суток твердения модуль упругости фиброцементогрунтового покрытия составил 107 МПа, что на 16,3 % выше расчётного значения модуля упругости. Через 56 суток твердения модуль упругости фиброцементогрунтового покрытия составил 115 МПа, что на 25,0 % выше расчётного значения модуля упругости (рисунок 5).

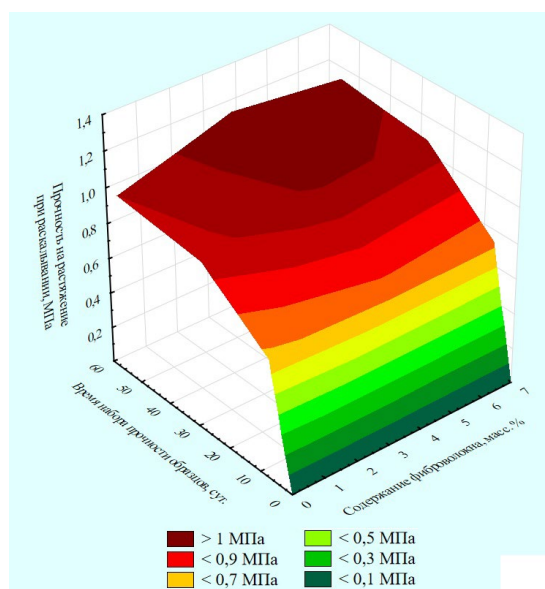


Рисунок 4. Поверхность отклика прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от содержания фиброволокна и времени набора прочности фиброцементогрунта

Figure 4. Surface response of tensile strength during splitting depending on the fiber content and the time of strengthening of the fiber cement soil

Модуль упругости дорожной одежды с фиброцементогрунтовым покрытием в пределах всего рассматриваемого периода набора прочности до 56 суток также имеет большее значение — от 5,4 до 10,8 % по сравнению с показателями модуля упругости цементогрунтового покрытия (рисунок 6).

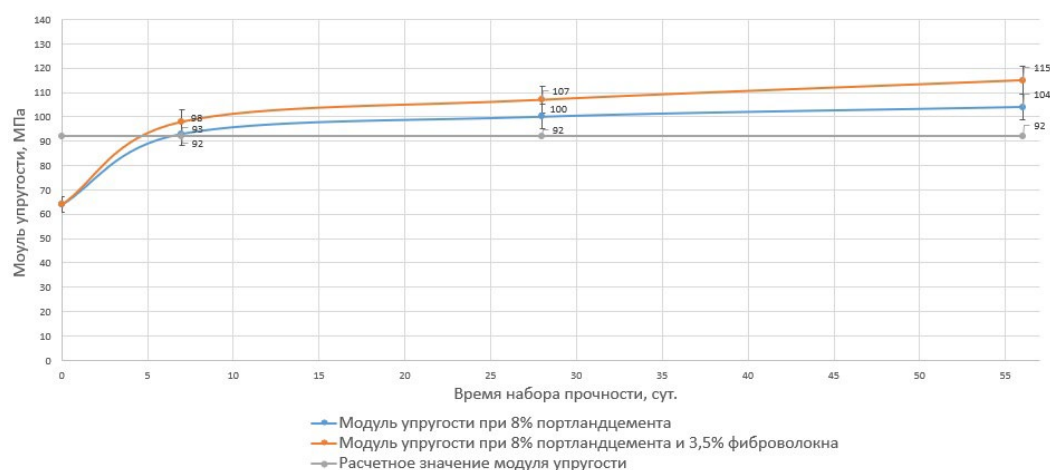


Рисунок 5. Изменение модуля упругости в зависимости от времени набора прочности покрытия

Figure 5. Change in elastic modulus depending on the time of coating hardening

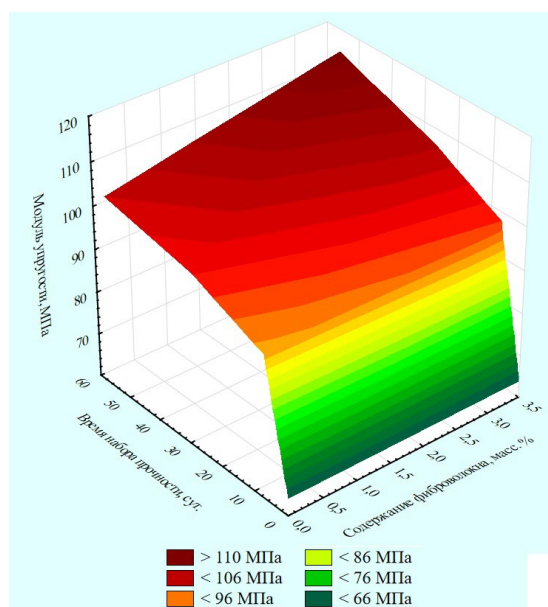


Рисунок 6. Поверхность отклика модуля упругости в зависимости от содержания фиброволокна и времени набора прочности покрытия

Figure 6. Surface response of the elastic modulus depending on the fiber content and the time of coating hardening

4. Обсуждение и заключение

Таким образом, результаты исследований показали высокую эффективность применения добавки базальтового фиброволокна в составе фиброцементогрунтов для применения в конструктивных слоях дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог. Добавка фибры позволяет увеличивать прочностные показатели, в особенности прочность на растяжение при раскалывании до 20 %, что способствует высокой трещиностойкости фиброцементогрунтовых покрытий дорожных одежд. При этом для получения максимальных прочностных показателей требуется оптимальное содержание добавки базальтового фиброволокна в составе фиброцементогрунтовой смеси в количестве 3,5 % от массы сухого грунта, что способствует формированию однородной кристаллической дисперсно-армированной структуры материала.

Прочностные показатели фиброцементогрунта значительно превышают показатели цементогрунтов без добавки фибры. При этом в период с 28 до 56 суток твердения рост прочности фиброцементогрунтов происходит более интенсивно по сравнению с цементогрунтом, что свидетельствует об эффективном формировании кристаллической дисперсно-армированной структуры материала в процессе гидратации и гидролиза портландцемента при взаимодействии с частицами грунта и фибры.

Дорожная одежда лесовозной автомобильной дороги с фиброцементогрунтовым покрытием через 56 суток твердения имеет фактический показатель модуля упругости,

превышающий расчётный на 25,0 %, что свидетельствует о высоком гарантийном запасе, надёжности и длительном сроке её службы в условиях высоких транспортных нагрузок. При этом благодаря высоким прочностным показателям, минимальный период достижения фактического модуля упругости до расчётного показателя 92 МПа у фиброцементогрунтового покрытия составил 5 суток, а у цементогрунтового покрытия — 7 суток.

Лабораторные исследования и строительство опытного участка лесовозной автомобильной дороги доказали техническую и технологическую возможность, а также высокую эффективность устройства фиброцементогрунтовых слоёв в конструктивных слоях дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог.

Список литературы

1. Чудинов С. А. Укреплённые грунты в строительстве лесовозных автомобильных дорог. Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. 174 с.
2. Roger L. B., Brockenbrough P. E. Highway Engineering Handbook. New York: McGraw-Hill, 2009. 885 p.
3. Бавбель Е. И., Игнатенко В. В., Науменко А. И. Конструирование и методика расчёта дорожных одежд из укрепленных грунтов // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2016. № 2 (184). С. 58—60.
4. Chudinov S. Improving the physical and mechanical properties of fortified soil for road construction in the forest zone // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 817. P. 1—9. DOI: 10.1088/1757-899X/817/1/012007.
5. Чудинов С. А. Совершенствование технологии укрепления грунтов в строительстве автомобильных дорог лесного комплекса. Екатеринбург: УГЛТУ, 2022. 164 с.
6. Лыщик П. А., Плышевский С. В., Науменко А. И. Использование комплексного вяжущего для укрепления грунтов земляного полотна лесных автомобильных дорог // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2013. № 2 (158). С. 39—42.
7. Vijayan D. S. Effect of Solid waste based stabilizing material for strengthening of Expansive soil — A review // Environmental Technology & Innovation. 2020. No. 20. P. 54—61.
8. Jones C. Soil consolidation and strengthening using electrokinetic geosynthetics — concepts and analysis // Geosynthetics. 2006. P. 411—414.
9. Голубева Е. А., Плахотный А. Б. Практика применения дорожного полимерцементогрунта на федеральной трассе «Амур» // Техника и технологии строительства. 2017. № 3 (11). С. 45—49.
10. Beeghly J., Schröck M. Dredge material stabilization using the pozzolanic or sulfo-pozzolanic reaction of lime by-products to make an engineered structural fill // International Journal of Soil, Sediment and Water. 2010. No. 3 (11). P. 1—21.
11. Road Soil Cement with Complex Additives Based on Organosilicon Compounds and Electrolytes / L. Mavliev, P. Bulanov, E. Vdovin [et al.] // ZKG: zement-kalk-gips international. 2016. No. 9 (69). P. 49—54. EDN: XFPM SL.
12. Патент 2785742 С1 РФ, МПК E02D 3/12, E01C 3/04, E01C 7/36, C04B 28/04, C04B 111/20. Фиброцементогрунтовая смесь: № 2022105876: заявл. 05.03.2022: опубл. 12.12.2022 / С. А. Чудинов.

References

1. Chudinov S. A. *Reinforced soils in the construction of logging roads*. Ekaterinburg, USFEU Publ., 2020. 174 p. (In Russ.)
2. Roger L. B., Brockenbrough P. E. *Highway Engineering Handbook*. New York, McGraw-Hill, 2009. 885 p.
3. Bavbel E. I., Ignatenko V. V., Naumenko A. I. Design and calculation methods for pavements from reinforced soils. *Proceedings of BSTU. Forestry and woodworking industry*, 2016, no. 2 (184), pp. 58—60. (In Russ.)
4. Chudinov S. Improving the physical and mechanical properties of fortified soil for road construction in the forest zone. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 817, pp. 1—9. doi: 10.1088/1757-899X/817/1/012007.
5. Chudinov S. A. *Improving the technology of soil stabilization in the construction of roads of the forestry complex*. Ekaterinburg, USFEU Publ., 2022. 164 p. (In Russ.)
6. Lyschchik P. A., Plyshevsky S. V., Naumenko A. I. The use of a complex binder to strengthen the subgrade soils of forest roads. *Proceedings of BSTU. Forestry and woodworking industry*, 2013, no. 2 (158), pp. 39—42. (In Russ.)
7. Vijayan D. S. Effect of Solid waste based stabilizing material for strengthening of Expansive soil — A review. *Environmental Technology & Innovation*, 2020, no. 20, pp. 54—61.
8. Jones C. Soil consolidation and strengthening using electrokinetic geosynthetics — concepts and analysis. *Geosynthetics*, 2006, pp. 411—414.
9. Golubeva E. A., Plahotniy A. B. The practice of using road polymer cement soil on the federal highway «Amur». *Technique and technology of construction*, 2017, no. 3 (11), pp. 45—49 (In Russ.)
10. Beeghly J., Schröck M. Dredge material stabilization using the pozzolanic or sulfo-pozzolanic reaction of lime by-products to make an engineered structural fill. *International Journal of Soil, Sediment and Water*, 2010, no. 3 (11), pp. 1—21.
11. Mavliev L., Bulanov P., Vdovin E., Zaharov V., Gimazov A. Road Soil Cement with Complex Additives Based on Organosilicon Compounds and Electrolytes. *ZKG: zement-kalk-gips international*, 2016, no. 9 (69), pp. 49—54. EDN: XFPM SL.
12. Chudinov S. A. Fiber cement soil mixture. Patent RF, no. RU 2785742 C1, 2022. (In Russ.)

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7223

УДК 630*378.33

Статья

Автоматизация планирования первоначального сплава лесоматериалов в плоских сплоточных единицах

Васильев Владимир Викторович

*кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I (Российская Федерация),
vasiliev.vladimir87@mail.ru*

Получена: 7 июля 2023 / Принята: 4 апреля 2024 / Опубликовано: 12 апреля 2024

Аннотация: Эффективное и экономически выгодное выполнение первоначального сплава лесоматериалов обеспечивается научно обоснованным планированием сплавных работ. Для выполнения оперативного планирования первоначального сплава лесоматериалов в усовершенствованных плоских сплоточных единицах разработана специализированная компьютерная программа. Она даёт возможность выполнить расчёт транспортно-эксплуатационных показателей плоских сплоточных единиц в зависимости от транспортных условий, параметров используемых круглых лесоматериалов, физико-механических свойств сплаваемой древесины, процентного содержания древесины повышенной и ограниченной плавучести и вида используемого сплоточного такелажа. Также программа позволяет построить графики зависимости осадки плоских сплоточных единиц от основных факторов, влияющих на данный показатель. С помощью разработанной компьютерной программы было реализовано планирование первоначального сплава лесоматериалов в усовершенствованных плоских сплоточных единицах при сплаве вольницей для условий, когда изменяются габариты сплавного хода в период навигации. Также установлено, что в весенний и осенний периоды при изменении минимальной глубины сплавного хода от 2,0 до 1,4 м и при варьировании минимальной ширины сплавного хода от 10,0 до 8,8 м обязательно используется конструкция плоской сплоточной единицы, выполненной по патенту РФ № 2777676. В летний период, когда габариты сплавного хода на протяжении длительного периода времени принимают минимальное значение, т. е. минимальная глубина сплавного хода равна 1,3 м, а минимальная ширина сплавного хода — 8,6 м, следует применять конструкцию плоской сплоточной единицы, выполненную по патенту РФ № 210485.

Применение разработанной компьютерной программы позволяет автоматизировать оперативное планирование первоначального сплава лесоматериалов в плоских сплотовых единицах.

Ключевые слова: плоская сплотовая единица; осадка; габариты сплавного хода; объём древесины

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7223

Article

Automation of planning of the initial timber floating in flat raft sections

Vladimir Vasiliev

*Ph. D. in engineering, associate professor, Voronezh State Agrarian University
named after Emperor Peter the Great (Russian Federation), vasiliev.vladimir87@mail.ru*

Received: 7 July 2023 / Accepted: 4 April 2024 / Published: 12 April 2024

Abstract: Efficient and cost-effective performance of the initial timber floating is provided by scientifically sound planning of rafting operations. A specialized computer program has been developed to carry out operational planning of the initial timber floating in improved flat raft sections. It makes it possible to calculate the transport and operational indicators of flat raft units depending on the transport conditions, the parameters of the round timber, the physical and mechanical properties of the raft wood, the percentage of wood with increased and limited buoyancy, and the type of raft bracing used. The program also allows plotting the dependence of the depth of the flat raft immersion on the main factors affecting this indicator. Computer-aided planning of the initial timber floating was implemented in improved flat raft units during freestyle rafting for conditions when the dimensions of the floating route change during navigation. It is established that in the spring and autumn when the minimum depth of the floating route varies from 2.0 to 1.4 m and the minimum width of the floating route varies from 10.0 to 8.8 m, the design of a flat raft made according to RF patent No. 2777676 should be used. In the summer, when the dimensions of the floating route for a long period of time are of a minimum value, that is, the minimum depth of the floating route is 1.3 m, and the minimum width of the floating route is 8.6 m, the design of a flat raft unit made according to RF patent No. 210485 should be used. The application of the developed computer program allows automating the operational planning of the initial timber floating in flat raft sections.

Keywords: flat raft unit; draft; dimensions of the floating route, volume of wood

1. Введение

Реализация первоначального сплава лесоматериалов по известным транспортно-технологическим схемам [1—2], функционирующим на базе плоских сплоточных единиц, обеспечивается следующими мероприятиями [3—8]:

- Разработка современных плоских сплоточных единиц [9—14], характеризующихся высокими транспортно-эксплуатационными показателями.
- Создание технических средств [15], [16], предназначенных для изготовления усовершенствованных плоских сплоточных единиц.
- Оперативное планирование первоначального сплава лесоматериалов в усовершенствованных плоских сплоточных единицах при изменении габаритов сплавного хода, параметров лесоматериалов и физико-механических свойств сплавленной древесины на протяжении всей навигации.

Последнее мероприятие требует создания специальных программ для электронно-вычислительных машин (ЭВМ), позволяющих оперативно произвести расчёт основных транспортно-эксплуатационных показателей сплоточных единиц, т. к. требуется неоднократный перерасчёт транспортно-эксплуатационных показателей плоских сплоточных единиц в результате изменения транспортных условий из-за влияния климатических факторов.

Цель работы — разработать программу для ЭВМ, предназначенную для автоматизации процесса планирования первоначального сплава лесоматериалов в усовершенствованных плоских сплоточных единицах, и реализовать оперативное планирование первоначального сплава лесоматериалов при изменении транспортных условий на протяжении всей навигации.

2. Материалы и методы

При разработке программы для ЭВМ, которая предназначена для автоматизации процесса планирования первоначального сплава лесоматериалов в плоских сплоточных единицах, был произведён анализ российских и зарубежных систем программирования [17—27]. В интегрированной системе программирования Borland Delphi 7 [28—32] на языке Object Pascal создана многофункциональная программа для ЭВМ [33], интерфейс которой представлен на рисунке 1. Данная программа позволяет не только достоверно выполнить планирование первоначального сплава лесоматериалов в усовершенствованных плоских сплоточных единицах, но и построить графики зависимости осадки плоских сплоточных единиц от основных факторов, влияющих на данный показатель [33], [34]. Расчёт транспортно-эксплуатационных показателей может осуществляться с учётом изменения транспортных условий, параметров используемых круглых лесоматериалов, физико-механических свойств сплавленной древесины, процентного содержания древесины повышенной и ограниченной плавучести, а также вида используемого сплоточного такелажа.

В программе исходный текст имеет объём 1,9 Мбайт, а сама программа предъявляет определённые требования к компьютеру, который должен иметь процессор не ниже Pentium 1,6 ГГц и объём оперативной памяти не менее 256 Мбайт.

Работа в предлагаемой программе начинается посредством командной кнопки «Расчётный анализ» (см. рисунок 1). С помощью данной командной кнопки переходим в открывшееся окно «Расчётный анализ» (рисунок 2а). В открывшемся окне «Расчётный анализ» «Конструкция плоской сплottedной единицы № 1» — это плоская сплottedная единица, выполненная по патенту РФ № 2777674 (ПСЕ1). «Конструкция плоской сплottedной единицы № 2» — это плоская сплottedная единица, выполненная по патенту РФ № 210485 (ПСЕ2), а «Конструкция плоской сплottedной единицы № 3» — это плоская сплottedная единица, выполненная по патенту РФ № 2777676 (ПСЕ3). Командная кнопка «Расчёт» даёт возможность рассчитать по отдельности транспортно-эксплуатационные показатели каждой усовершенствованной плоской сплottedной единицы. В свою очередь, при выборе кнопки «Сводный расчёт» появляется рабочее окно «Сводный расчётный анализ плоских сплottedных единиц» (рисунок 2б). В появившемся окне производится расчёт транспортно-эксплуатационных показателей данных сплottedных единиц.



Рисунок 1. Интерфейс программы планирования сплава лесоматериалов в усовершенствованных плоских сплottedных единицах

Figure 1. Interface of the timber floating planning program in advanced flat raft units

Оперативное планирование первоначального сплава лесоматериалов в усовершенствованных плоских сплottedных единицах при изменении транспортных условий на протяжении всей навигации осуществляется при следующем условии: в ходе всей навигации изменяются минимальная глубина $h_{лх}$ и минимальная ширина $b_{лх}$ сплавного хода, а остальные параметры факторов, влияющих на транспортно-эксплуатационные показатели плоских сплottedных единиц, остаются постоянными.



a

б

Рисунок 2. Интерфейс командной кнопки «Расчётный анализ»: *a* — форма расчётного анализа; *б* — форма сводного расчётного анализа

Figure 2. Interface of the «Calculation Analysis» command button: **(a)** calculation analysis form; **(b)** summary calculation analysis form

Обуславливаемся, что при открытии навигации минимальная глубина сплавного хода составляет 2,0 м. Затем на протяжении навигации минимальная глубина сплавного хода уменьшается с шагом 0,1 м до 1,3 м, что является значением летнего периода, когда наступает межень. В осенний период минимальная глубина сплавного хода увеличивается с шагом 0,1 м до 1,5 м. Таким образом, расчёт транспортно-эксплуатационных показателей усовершенствованных плоских сплотовых единиц будет осуществляться при глубине $h_{ЛХ}$, равной 2,0, 1,9, 1,8, 1,7, 1,6, 1,5, 1,4, 1,3, 1,4 и 1,5 м. Минимальная ширина сплавного хода при открытии навигации составляет 10,0 м. На протяжении всей навигации минимальная ширина сплавного хода уменьшается с шагом 0,2 м до 8,6 м, что соответствует показателю летнего периода, когда наступает межень. В осенний период ширина $b_{ЛХ}$ увеличивается с шагом 0,2 м до 9,1 м. Следовательно, расчёт транспортно-эксплуатационных показателей

усовершенствованных плоских сплотовых единиц будет осуществляться при ширине $b_{лх}$, равной 10,0, 9,8, 9,6, 9,4, 9,2, 9,0, 8,8, 8,6, 8,8 и 9,0 м.

Параметры идентичных факторов, влияющих на транспортно-эксплуатационные показатели усовершенствованных плоских сплотовых единиц, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры идентичных факторов, влияющих на транспортно-эксплуатационные показатели усовершенствованных плоских сплотовых единиц

Table 1. Parameters of identical factors affecting the transport and operational performance of improved flat raft units

Факторы	Плоская сплотовая единица		
	ПСЕ1	ПСЕ2	ПСЕ3
Длина круглых лесоматериалов, м	6,0	6,0	6,0
Диаметр круглых лесоматериалов в верхнем отрезе во всех рядах, см	20,0	20,0	20,0
Плотность древесины повышенной плавучести, кг/м ³	700,0	700,0	700,0
Плотность древесины ограниченной плавучести, кг/м ³	800,0	800,0	800,0
Содержание древесины повышенной плавучести, %	50,0	50,0	50,0
Содержание древесины ограниченной плавучести, %	50,0	50,0	50,0
Запас для сплава плоских сплотовых единиц вольницей, м	2,0	2,0	2,0
Донный запас, м	0,3	0,3	0,3
Средняя сбежистость круглых лесоматериалов, см на 1,0 м	1,0	1,0	1,0

Для ПСЕ1 идентичными факторами с разными параметрами являются коэффициент полндревесности и масса сплотового такелажа. Коэффициент полндревесности плоской сплотовой единицы для диаметра круглых лесоматериалов в верхнем отрезе 20,0 см принимается равным 0,47, а масса сплотового такелажа составляет 50,0 кг. К неидентичным факторам относятся следующие: ширина кольца с ребристой внутренней поверхностью 5,0 см; запас длины прокладки от кольца до её конца 0,3 м; расстояние от кольца до места крепления стропы 0,2 м; предельно допустимое напряжение при изгибе верхней прокладки (сосна обыкновенная) $4,8 \cdot 10^7$ Па; предельно допустимое напряжение при изгибе нижней прокладки (сосна обыкновенная) $4,8 \cdot 10^7$ Па; средняя сбежистость лесоматериалов верхней прокладки 1,0 см на 1 м; средняя сбежистость лесоматериалов нижней прокладки 1,0 см на 1 м.

Идентичные факторы с разными параметрами для ПСЕ2: коэффициент полндревесности и масса сплотового такелажа (скобы). В данном случае коэффициент полндревесности плоской сплотовой единицы для диаметра круглых лесоматериалов в верхнем отрезе 20,0 см будет 0,70, а масса сплотового такелажа (скобы) — 50,0 кг. Неидентичные факторы для данной сплотовой единицы — это число проволоки в гибкой связи (15 шт.); предельно

допустимое напряжение проволоки при растяжении $5 \cdot 10^8$ Па; плотность материала проволоки 7800 кг/м^3 ; предельно допустимое напряжение гибкой связи при растяжении $5 \cdot 10^8$ Па; плотность материала гибкой связи 7800 кг/м^3 .

В отношении ПСЕЗ идентичные факторы с разными параметрами: коэффициент полндревесности и масса сплотноного такелажа (скобы). Для диаметра круглых лесоматериалов в верхнем отрезе 20,0 см коэффициент полндревесности данной плоской сплотноной единицы принимается равным 0,81, а масса сплотноного такелажа (скобы) составляет 50,0 кг. Неидентичные факторы, касающиеся ПСЕЗ, следующие: коэффициент уменьшения диаметра для внутренних поперечных прокладок 0,85; коэффициент уменьшения диаметра для наружных поперечных прокладок 1,0; число проволоки в гибкой связи 15 шт.; предельно допустимое напряжение проволоки при растяжении $5 \cdot 10^8$ Па; плотность материала проволоки 7800 кг/м^3 ; предельно допустимое напряжение гибкой связи при растяжении $5 \cdot 10^8$ Па; плотность материала гибкой связи 7800 кг/м^3 .

Принимая во внимание все условия по планированию первоначального сплава лесоматериалов в усовершенствованных плоских сплотноных единицах (при изменении транспортных условий на протяжении всей навигации) и используя установленные требования к параметрам всех факторов, влияющих на транспортно-эксплуатационные показатели сплотноных единиц, было выполнено оперативное планирование первоначального сплава лесоматериалов. При этом оперативное планирование первоначального сплава лесоматериалов в усовершенствованных плоских сплотноных единицах реализовывалось путём расчёта их основных транспортно-эксплуатационных показателей.

3. Результаты

На основе параметров всех факторов, влияющих на транспортно-эксплуатационные показатели сплотноных единиц, реализовано оперативное планирование первоначального сплава лесоматериалов в усовершенствованных плоских сплотноных единицах. Полученные расчётные данные по основным транспортно-эксплуатационным показателям плоских сплотноных единиц приведены в таблице 2. Основные транспортно-эксплуатационные показатели усовершенствованных плоских сплотноных единиц, приведённые в таблице 2, подтверждают, что независимо от изменения минимальной ширины и глубины сплавного хода ПСЕ2 и ПСЕ3 имеют наиболее высокие показатели. При изменении ширины $b_{\text{ЛХ}}$ и глубины $h_{\text{ЛХ}}$ фактическая длина ПСЕ1, ПСЕ2 и ПСЕ3 остаётся постоянной, т. к. она зависит от длины заготавливаемых круглых лесоматериалов. В свою очередь, такие показатели у ПСЕ1, ПСЕ2 и ПСЕ3, как фактическая ширина, высота и осадка, непостоянные, и при сокращении габаритов сплавного хода они уменьшаются. Следовательно, сокращение габаритов сплавного хода приводит к уменьшению фактической ширины и высоты плоских сплотноных единиц, а значит, уменьшается объём древесины в них.

Таблица 2. Результаты расчёта основных транспортно-эксплуатационных показателей усовершенствованных плоских сплотовых единиц

Table 2. The results of the calculation of the main transport and operational indicators of improved flat raft units

Транспортно-эксплуатационные показатели	Параметры показателей $\frac{h_{ЛХ}}{b_{ЛХ}}$									
	$\frac{2,0}{10,0}$	$\frac{1,9}{9,8}$	$\frac{1,8}{9,6}$	$\frac{1,7}{9,4}$	$\frac{1,6}{9,2}$	$\frac{1,5}{9,0}$	$\frac{1,4}{8,8}$	$\frac{1,3}{8,6}$	$\frac{1,4}{8,8}$	$\frac{1,5}{9,0}$
—	Плоская сплотовая единица № 1 (ПСЕ1)									
Фактическая длина, м	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Фактическая ширина, м	5,07	4,84	4,61	4,15	3,92	3,46	3,0	2,54	3,0	3,46
Фактическая высота, м	2,26	1,98	1,96	1,66	1,64	1,34	1,3	1,26	1,3	1,34
Фактическая осадка, м	1,7	1,49	1,48	1,25	1,24	1,01	0,98	0,95	0,98	1,01
Фактический объём древесины, м ³	32,31	27,06	25,51	19,5	18,17	13,12	11,02	9,01	11,02	13,12
—	Плоская сплотовая единица № 2 (ПСЕ2)									
Фактическая длина, м	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Фактическая ширина, м	5,29	4,83	4,6	4,14	3,91	3,45	2,99	2,53	2,99	3,45
Фактическая высота, м	2,05	2,03	1,78	1,76	1,5	1,48	1,24	1,23	1,24	1,48
Фактическая осадка, м	1,58	1,57	1,37	1,36	1,15	1,14	0,95	0,95	0,95	1,14
Фактический объём древесины, м ³	45,58	41,25	34,35	30,7	24,59	21,5	15,57	13,08	15,57	21,5
—	Плоская сплотовая единица № 3 (ПСЕ3)									
Фактическая длина, м	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2
Фактическая ширина, м	4,83	4,6	4,37	3,91	3,45	3,22	2,76	2,07	2,76	3,22
Фактическая высота, м	2,22	2,02	1,82	1,82	1,62	1,43	1,43	1,23	1,43	1,43
Фактическая осадка, м	1,69	1,54	1,39	1,39	1,23	1,08	1,08	0,93	1,08	1,08
Фактический объём древесины, м ³	53,9	46,73	40,02	35,8	28,14	23,05	19,75	12,74	19,75	23,05

Обоснование эффективности выполнения первоначального сплава лесоматериалов на базе определённой сплотовой единицы реализуется с помощью графиков зависимости объёма древесины в усовершенствованных плоских сплотовых единицах от параметров сплавного хода. Указанные графики, изображённые на рисунке 3, были построены на основе расчётных данных, приведённых в таблице 2. В соответствии с изображёнными графиками наименьший объём содержания древесины у ПСЕ1, а наибольший объём древесины — у ПСЕ3. Исключением является случай, когда $h_{ЛХ} = 1,3$ м и $b_{ЛХ} = 8,6$ м, что соответствует межённому периоду года. При данных обстоятельствах ПСЕ2 содержит на 2,7 % больше древесины по сравнению с ПСЕ3.

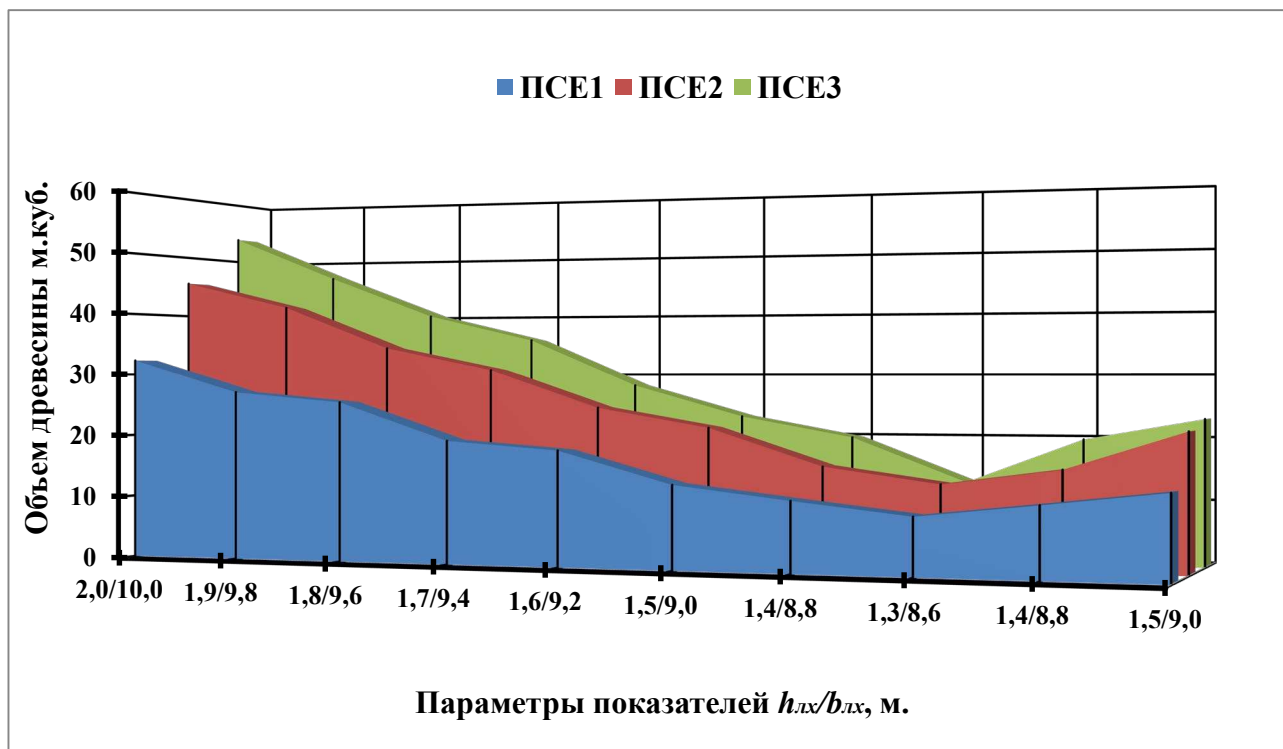


Рисунок 3. Графики зависимости объёма древесины в усовершенствованных плоских сплочных единицах от глубины и ширины сплавного хода

Figure 3. Graphs of the dependence of the volume of wood in improved flat raft units on the depth and width of the floating route

В практических условиях меженный период года, когда $h_{лх} = 1,3$ м, а $b_{лх} = 8,6$ м, может быть краткосрочным, интервальным и долгосрочным. Краткосрочный меженный период — это единичный случай в течение одной навигации, когда габариты сплавного хода имеют минимальные показатели. Интервальный меженный период — это неоднократное установление минимальных показателей сплавного хода в течение одной навигации, т. е. когда присутствуют постоянные колебания габаритов сплавного хода. В данном случае высшая точка — это максимальные габариты сплавного хода, а низшая точка — это минимальные габариты сплавного хода. Долгосрочный меженный период — это когда габариты сплавного хода однократно принимают минимальные значения в рамках одной навигации и на протяжении длительного времени остаются неизменными. При этом для каждого бассейна краткосрочный, интервальный и долгосрочный периоды устанавливаются индивидуально.

Так как, в соответствии с графиком, изображённым на рисунке 3, меженный период года влияет на выбор конструкции плоской сплочной единицы, которая будет считаться базовой, поэтому требуется предметное обоснование целесообразности использования конструкции ПСЕ2 по отношению конструкции ПСЕ3 для каждого вида меженного периода.

Для краткосрочного меженного периода года обуславливаемся, что данный промежуток времени составляет пять рабочих дней. Рабочий день включает 8 ч, где интервал времени между плывущими плоскими сплотовыми единицами составляет 0,1 ч. Следовательно, объём сплава лесоматериалов в ПСЕЗ за пять рабочих дней будет равен $5096,0 \text{ м}^3$. В свою очередь, объём сплава лесоматериалов в ПСЕ2 за пять рабочих дней составит $5232,0 \text{ м}^3$. Из данных расчётов видно, что разность между объёмом сплава лесоматериалов в ПСЕ2 и объёмом сплава лесоматериалов в ПСЕЗ равна $136,0 \text{ м}^3$. Значит, целесообразность использования конструкции ПСЕ2 взамен конструкции ПСЕЗ при межении присутствует, т. к. транспортировка $136,0 \text{ м}^3$ лесоматериалов сухопутным транспортом влечёт большие финансовые затраты. Исключение составляет тот случай, когда в меженный период планируется сплав лесоматериалов объёмом меньше или равным $5096,0 \text{ м}^3$, что в практических условиях будет являться сплавом остаточного объёма заготовленных лесоматериалов на лесосеке.

Основным условием для интервального меженного периода является то, что в указанный период присутствует пятикратное установление минимальных показателей сплавного хода в течение одной навигации общей продолжительностью 20 рабочих дней. При этом рабочий день составляет восемь часов, а интервал времени между плывущими плоскими сплотовыми единицами равен 0,1 ч. На основе принятых условий объём сплава лесоматериалов в ПСЕЗ за 20 рабочих дней составляет $20384,0 \text{ м}^3$, а объём сплава лесоматериалов в ПСЕ2 за такой же период — $20928,0 \text{ м}^3$. Таким образом, объём сплава лесоматериалов в ПСЕ2 превышает на $544,0 \text{ м}^3$ объёма сплава лесоматериалов в ПСЕЗ. Отсюда следует, что использование конструкции ПСЕ2 в меженный период является целесообразным, т. к. исключается необходимость транспортировки $544,0 \text{ м}^3$ лесоматериалов сухопутным транспортом. Если в меженный период планируется сплав лесоматериалов объёмом меньше или равным $20384,0 \text{ м}^3$, то необходимо использовать конструкцию ПСЕЗ. Данные обстоятельства возникают при сплаве остаточного объёма заготовленных лесоматериалов на лесосеке.

В отношении долгосрочного меженного периода регламентируются следующие условия. Продолжительность данного периода составляет 35 рабочих дней. Рабочий день устанавливается восьмичасовым, а интервал времени между плывущими плоскими сплотовыми единицами — 0,1 ч. Тогда объём сплава лесоматериалов в ПСЕЗ за 35 рабочих дней составит $35672,0 \text{ м}^3$. При этом объём сплава лесоматериалов в ПСЕ2 за такой же период будет равен $36624,0 \text{ м}^3$. Учитывая приведённый расчёт, можно сделать вывод, что целесообразность использования конструкции ПСЕ2 взамен конструкции ПСЕЗ при межении присутствует. Это связано с тем, что объём сплава лесоматериалов в ПСЕЗ меньше на $952,0 \text{ м}^3$ по сравнению с объёмом сплава лесоматериалов в ПСЕ2. Целесообразность использования конструкции ПСЕЗ будет в том случае, когда сплав лесоматериалов в меженный период меньше или равен $35672,0 \text{ м}^3$. Данные обстоятельства возникают при сплаве остаточного объёма заготовленных лесоматериалов на лесосеке.

Приведённые расчётные данные в таблице 2, построенные графики (рисунок 3) и установленный объём сплава лесоматериалов в меженный период года показывают, что при организации первоначального сплава лесоматериалов в усовершенствованных плоских сплотовых единицах при условии сплава их вольницей рационально использовать плоские сплотовые единицы, выполненные по патенту РФ № 2777676 (ПСЕ3) и по патенту РФ № 210485 (ПСЕ2). Данные плоские сплотовые единицы будут выступать как базовые при организации первоначального сплава лесоматериалов. В весенний и осенний периоды при изменении минимальной ширины сплавного хода от 10,0 до 8,7 м и минимальной глубины сплавного хода от 2,0 до 1,4 м следует использовать конструкцию плоской сплотовой единицы, выполненную по патенту РФ № 2777676 (ПСЕ3). Если $b_{лх} = 8,6$ м, а $h_{лх} = 1,3$ м, то в летний период года, когда наступает межень, необходимо применять конструкцию плоской сплотовой единицы, выполненную по патенту РФ № 210485 (ПСЕ2). Практическое использование различных конструкций плоских сплотовых единиц в зависимости от фактических габаритов сплавного хода в конкретный период времени осуществимо за счёт того, что грузовая платформа [16] позволяет изготавливать плоские сплотовые единицы ПСЕ3 (патент РФ № 2777676) и ПСЕ2 (патент РФ № 210485) без внесения в них конструктивных изменений. Указанная комбинация использования различных конструкций усовершенствованных плоских сплотовых единиц необходима для того, чтобы реализовать сплав максимального объёма лесоматериалов по водным объектам, имеющим лимитирующие габариты сплавного хода, за короткий промежуток времени.

4. Обсуждение и заключение

Разработанная компьютерная программа для автоматизации процесса планирования первоначального сплава лесоматериалов в усовершенствованных плоских сплотовых единицах является современным решением для оперативного планирования сплава плоских сплотовых единиц вольницей при изменении транспортных условий, параметров используемых круглых лесоматериалов, физико-механических свойств сплавляемой древесины, процентного содержания древесины повышенной и ограниченной плавучести, а также вида используемого сплотового такелажа. Программа для ЭВМ учитывает конструктивные особенности современных плоских сплотовых единиц (патенты РФ № 2777674, № 210485, № 2777676), предназначенных для эксплуатации в сложных условиях плавания, и позволяет установить конструкцию плоской сплотовой единицы, которая будет наиболее эффективной при сложившихся условиях выполнения сплава лесоматериалов. При этом установление приоритетности определённой конструкции усовершенствованной плоской сплотовой единицы осуществляется по расчётным данным её транспортно-эксплуатационных показателей для конкретных условий сплавных работ.

Также реализовано оперативное планирование первоначального сплава лесоматериалов в усовершенствованных плоских сплоточных единицах при условии изменения ширины сплавного хода от 10,0 до 8,7 м и глубины сплавного хода от 2,0 до 1,4 м. Выявлено, что при изменении ширины и глубины сплавного хода следует использовать конструкцию плоской сплоточной единицы, выполненную по патенту РФ № 2777676 (ПСЕЗ). В том случае, когда $b_{\text{лх}} = 8,6$ м, а $h_{\text{лх}} = 1,3$ м, необходимо применять конструкцию плоской сплоточной единицы, выполненную по патенту РФ № 210485. Указанная комбинация в практических условиях реализуема, т. к. грузовая платформа (патент РФ № 213802) позволяет изготавливать плоские сплоточные единицы (патенты РФ № 2777676 и № 210485) при погрузке лесоматериалов на лесопромышленном складе (терминале) или непосредственно на лесосеке.

Предлагаемая комбинация использования конструкций усовершенствованных плоских сплоточных единиц позволит наиболее эффективно выполнить первоначальный сплав лесоматериалов с максимальным использованием пропускной способности эксплуатируемых водных объектов, в т. ч. и в меженный период года.

Список литературы

1. *Васильев В. В.* Транспортно-технологическая схема поставки древесины водным транспортом в плоских сплоточных единицах по принципу плоская сплоточная единица — плот // Арктика: инновационные технологии, кадры, туризм: Материалы междунар. научно-практич. онлайн-конф., г. Воронеж, 17—19 ноября 2020 г. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова», 2020. С. 335—340.
2. *Васильев В. В., Аксенов И. И.* Транспортно-технологическая схема поставки лесоматериалов потребителям в плоских сплоточных единицах по принципу плоская сплоточная единица — баржа // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: Материалы междунар. научно-практич. конф., г. Воронеж, 24—25 ноября 2020 г. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ», 2020. С. 30—33.
3. *Васильев В. В., Афоничев Д. Н.* Усовершенствованные системы плотового сплава лесоматериалов. Saarbrücken (Германия): Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 284 с.
4. *Васильев В. В., Афоничев Д. Н.* Обоснование показателя гибкости плота из сплоточных единиц // Известия вузов. Лесной журнал. 2022. № 4. С. 146—155. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-4-146-155.
5. *Васильев В. В., Афоничев Д. Н.* Использование плоских сплоточных единиц на первоначальном сплаве лесоматериалов // Известия вузов. Лесной журнал. 2022. № 1. С. 128—142. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-128-142.
6. *Васильев В. В.* Расчёт транспортно-эксплуатационных показателей усовершенствованной плоской сплоточной единицы // Resources and Technology. 2022. Т. 19, № 4. С. 1—22. DOI: 10.15393/j2.art.2022.6365.
7. *Perfiliev P., Zadrauskaite N., Rybak G.* Study of hydrodynamic resistance of a raft composed of the flat rafting units of various draft // International Multidisciplinary Scientific

- GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18 (1.5). Austria, 2018. P. 765—772.
8. Brevet 2882723 FR, Int. Cl.8 B63B 35/00, 3/08, 7/02. Embarcation modulaire pour le transport des grumes par voie d'eau / demandeur Roumengas Jonsa Guy; Mandataire SCHMITT. No. 0502132; la date de la demande 03.03.2005; la date de parution 21.10.2005, bulletin 06/36. 14 p.
 9. Патент 2777674 Р. Ф., МПК В65В 35/02, В65G 69/20. Плоская сплottedная единица / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев, В. А. Морковин, В. В. Абрамов, Е. В. Поздняков; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова» (RU). № 2021140068; заявл. 30.12.2021; опубл. 08.08.2022, Бюл. № 22. 8 с.
 10. Патент 210485 Р. Ф., МПК В63В 35/62. Плоская сплottedная единица / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев, В. А. Морковин, В. В. Абрамов, Е. В. Поздняков; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова» (RU). № 2021125409; заявл. 19.10.2020; опубл. 18.04.2022, Бюл. № 11. 5 с.
 11. Патент 2777676 Р. Ф., МПК В65В 35/02. Плоская сплottedная единица / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев, В. А. Морковин, В. В. Абрамов, Е. В. Поздняков; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова» (RU). № 2021140062; заявл. 30.12.2021; опубл. 08.08.2022, Бюл. № 22. 8 с.
 12. *Васильев В. В., Афоничев Д. Н.* Расчёт прочности модернизированной плоской сплottedной единицы // Resources and Technology. 2023. Т. 20, № 1. С. 1—25. DOI: 10.15393/j2.art.2023.6623.
 13. *Васильев В. В.* Расчёт транспортно-эксплуатационных показателей усовершенствованной плоской сплottedной единицы // Resources and Technology. 2022. Т. 19, № 4. С. 1—22. DOI: 10.15393/j2.art.2022.6365.
 14. *Васильев В. В.* Усовершенствованная плоская сплottedная единица с повышенным коэффициентом полндревесности // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: Материалы междунар. научно-практич. конф. (Россия, г. Воронеж, 25 ноября 2022 г.). Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ», 2022. С. 37—43.
 15. Патент 199681 Р. Ф., МПК В65G 69/00, 57/18. Сплottedная машина / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев, В. А. Морковин, Е. В. Поздняков; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова» (RU). № 2020119839; заявл. 08.06.2020; опубл. 14.09.2020, Бюл. № 26. 5 с.
 16. Патент 213802 Р. Ф., МПК В60Р 3/41. Грузовая платформа / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев, А. В. Лощенко; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский ГАУ» (RU). № 2022123837; заявл. 08.09.2022; опубл. 29.09.2022, Бюл. № 28. 10 с.
 17. *Афоничев Д. Н.* Информационные технологии в науке и производстве. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ», 2018. 122 с.

18. Информационные технологии / Д. Н. Афоничев, А. Н. Беляев, С. Н. Пиляев [и др.]. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ», 2016. 267 с.
19. *Schwalbe K.* Information technology project management. Cengage, 2019. 609 p.
20. *Brian K. W., Stacey C. S.* Using information technology (9th complete edition). McGraw-Hill, 2010. 606 p.
21. *Brian K. W., Stacey C. S.* Using information technology: a practical introduction to computers and communications. McGraw-Hill Education, 2015. 621 p.
22. *Schwalbe K.* Information technology project management (vol. 8). Cengage learning, 2016. 643 p.
23. *Otero A. R.* Information technology control and audit. Auerbach publications, 2019. 511 p.
24. *Dornberger R.* New trends in business information systems and technology: digital innovation and digital business transformation. Springer, 2021. 323 p.
25. *Ali Ismail Awad, Fairhurst M.* Information security: foundations, technologies and applications. Institution of Engineering & Technology, 2018. 418 p.
26. *Baldwin R.* The great convergence: information technology and the new globalization. Belknap Press, 2016. 344 p.
27. *Tatnall A.* Encyclopedia of education and information technologies. Springer, 2020. 1826 p.
28. *Gabrijelčič P.* Mastering Delphi programming: a complete reference guide. Packt Publishing, 2019. 674 p.
29. *Collingbourne H.* The little book of Delphi programming: learn to program with Object Pascal. Dark Neon, 2020. 194 p.
30. *Prasnikar D., Prasnikar N. Jr.* Delphi Thread Safety Patterns. Dark Neon, 2022. 324 p.
31. *Cantù M.* Delphi 2009 Handbook. Wintech Italia Srl, Italy, 2008. 400 p.
32. *Teti D.* Delphi Cookbook. Packt publishing, 2014. 332 p.
33. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022685549. Программа для планирования сплава древесины в плоских сплотовых единицах / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев, В. А. Морковин, Е. В. Поздняков; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова». Заявл. 24.12.2022, зарегистр. 24.12.2022.
34. *Васильев В. В.* Автоматизированное планирование сплава лесоматериалов в плоских сплотовых единицах // Современные вопросы автоматизации и систем управления в технических, организационных и экономических системах: Материалы национал. научно-практич. конф. студентов и молодых учёных, г. Воронеж, 27 марта 2023 г. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова», 2023. С. 13—23. URL: <https://vgltu.ru/nauka/konferencii/2023/-nacionalnaya-nauchno-prakticheskaya-konferenciya-studentov-i-molodyh-uchenyh-sovremennye-voprosy-avtomatizacii-i-sistem-upravlen>. Текст: электронный.

References

1. Vasiliev V. V. Transport and technological scheme of wood supply by water transport in flat-flow units according to the principle of flat-flow unit — raft. *Arctic: innovative technologies, personnel, tourism: materials of international scientific practice. Online conferences. Voronezh, November 17—19, 2020.* Voronezh, Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov, 2020, pp. 335—340. (In Russ.).
2. Vasiliev V. V., Aksenov I. I. Transport and technological scheme of timber supply to consumers in flat-flow units according to the principle of flat-flow unit — barge. *Science and education at the present stage of development: experience, problems and solutions: materials of the*

- international scientific and practical conference. Voronezh 24—25 November 2020. Voronezh, Voronezh State Agrarian University, 2020, pp. 30—33. (In Russ.).*
3. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. *Improved systems of raft timber alloy*. Saarbrücken (Germany), Publishing house LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 284 p. (In Russ.).
 4. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. Substantiation of the indicator of the flexibility of a raft of raft units. *Izvestiy vuzov. Lesnoi zhurnal*, 2022, no. 4, pp. 146—155. doi: 10.37482/0536-1036-2022-4-146-155. (In Russ.).
 5. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. The use of flat splice units on the initial timber alloy. *Izvestiy vuzov. Lesnoi zhurnal*, 2022, no. 1, pp. 128—142. doi: 10.37482/0536-1036-2022-1-128-142. (In Russ.).
 6. Vasiliev V. V. Calculation of transport and operational indicators of an improved flat-flow unit. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 4, pp. 1—22. doi: 10.15393/j2.art.2022.6365. (In Russ.).
 7. Perfiliev P., Zadrauskaite N., Rybak G. Study of hydrodynamic resistance of a raft composed of the flat rafting units of various draft. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18 (1.5)*. Austria, 2018, pp. 765—772.
 8. Patent 2882723 FR, Int. THIS.8 B63B 35/00, 3/08, 7/02. Modular boat for the transport of logs by water. Applicant Roumengas Jonsa Guy; Agent SCHMITT, no. 0502132; the date of application 03.03.2005; the date of publication 21.10.2005, bulletin 06/36. 14 p.
 9. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Morkovin V. A., Abramov V. V., Pozdnyakov E. V. Patent 2777674 R. F., IPC B65B 35/02, B65G 69/20. Flat splice unit. Applicant and patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov» (RU), no. 2021140068; application 30.12.2021; publ. 08.08.2022, Byul. no. 22. 8 p. (In Russ.).
 10. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Morkovin V. A., Abramov V. V., Pozdnyakov E. V. Patent 210485 R. F., IPC B63B 35/62. Flat splice unit. Applicant and patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov» (RU), no. 2021125409; application 19.10.2020; publ. 18.04.2022, Byul. no. 11. 5 p. (In Russ.).
 11. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Morkovin V. A., Abramov V. V., Pozdnyakov E. V. Patent 2777676 R. F., IPC B65B 35/02. Flat splice unit. Applicant and patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Forestry Engineering University named after G. F. Morozov» (RU), no. 2021140062; application 30.12.2021; publ. 08.08.2022, Byul. no. 22. 8 p. (In Russ.).
 12. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. Calculation of the strength of a modernized flat-flow unit. *Resources and Technology*, 2023, vol. 20, no. 1, pp. 1—25. doi: 10.15393/j2.art.2023.6623. (In Russ.).
 13. Vasiliev V. V. Calculation of transport and operational indicators of an improved flat-flow unit. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 4, pp. 1—22. doi: 10.15393/j2.art.2022.6365. (In Russ.).
 14. Vasiliev V. V. An improved flat cohesive unit with an increased full-weight coefficient. *Science and education at the present stage of development: experience, problems and ways to solve them: materials of the International scientific and practical conference (Russia, Voronezh, November 25, 2022)*. Voronezh, Voronezh State Agrarian University, 2022, pp. 37—43. (In Russ.).
 15. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Morkovin V. A., Poznyakov E. V. Patent 199681 R. F., IPC B65G 69/00, 57/18. The Splotch machine. Applicant and patent holder Federal State

- Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov» (RU), no. 2020119839; application. 08.06.2020; publ. 14.09.2020, Bul. no. 26. 5 p. (In Russ.).
16. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Loschenko A. V. Patent 213802 R. F., IPC B60P 3/41. Cargo platform. Applicant and patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Agrarian University» (RU), no. 2022123837; application 08.09.2022; publ. 29.09.2022, Bul. no. 28. 10 p. (In Russ.).
 17. Afonichev D. N. *Information technologies in science and production*. Voronezh, Voronezh State Agrarian University, 2018. 122 p. (In Russ.).
 18. Afonichev D. N., Belyaev A. N., Pilyaev S. N., Zobov S. Yu. *Information technologies*. Voronezh, Voronezh State Agrarian University, 2016. 267 p. (In Russ.).
 19. Kathy Schwalbe. *Information technology project management*. Cengage, 2019. 609 p.
 20. Brian K. Williams, Stacey C. Sawyer. *Using information technology (9th complete edition)*. McGraw-Hill, 2010. 606 p.
 21. Brian K. Williams, Stacey C. Sawyer. *Using information technology: a practical introduction to computers and communications*. McGraw-Hill Education, 2015. 621 p.
 22. Kathy Schwalbe. *Information technology project management (vol. 8)*. Cenage learning, 2016. 643 p.
 23. Otero Angel R. *Information technology control and audit*. Auerbach publications, 2019. 511 p.
 24. Rolf Dornberger. *New trends in business information systems and technology: digital innovation and digital business transformation*. Springer, 2021. 323 p.
 25. Ali Ismail Awad, Michael Fairhurst. *Information security: foundations, technologies and applications*. Institution of Engineering & Technology, 2018. 418 p.
 26. Richard Baldwin. *The great convergence: information technology and the new globalization*. Belknap Press, 2016. 344 p.
 27. Arthur Tatnall. *Encyclopedia of education and information technologies*. Springer, 2020. 1826 p.
 28. Primož Gabrijelčič. *Mastering Delphi programming: a complete reference guide*. Packt Publishing, 2019. 674 p.
 29. Huw Collingbourne. *The little book of Delphi programming: learn to program with Object Pascal*. Dark Neon, 2020. 194 p.
 30. Dalija Prasnikar, Neven Jr. Prasnikar. *Delphi Thread Safety Patterns*. Dark Neon, 2022. 324 p.
 31. Marco Cantù. *Delphi 2009 Handbook*. Wintech Italia Srl, Italy, 2008. 400 p.
 32. Daniel Teti. *Delphi Cookbook*. Packt publishing, 2014. 332 p.
 33. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Morkovin V. A., Pozdnyakov E. V. Certificate of state registration of the computer program 2022685549. The program for planning wood alloy in flat cohesive units; applicant and copyright holder of the FSBEI VO «Voronezh State Forestry Engineering University named after G. F. Morozov». Claimed on 12/24/2022, registered on 12/24/2022. (In Russ.).
 34. Vasiliev V. V. Automated planning of timber alloy in flat cohesive units. *Modern issues of automation and control systems in technical, organizational and economic systems: materials of the National scientific and practical conference of students and young scientists, Voronezh, March 27, 2023*. Voronezh, FSBEI VO «Voronezh State Forestry Engineering University named after G. F. Morozov», 2023, pp. 13—23. Available at: <https://vgltu.ru/nauka/konferencii-/2023/nacionalnaya-nauchno-prakticheskaya-konferenciya-studentov-i-molodyh-uchenyh-sovremennye-voprosy-avtomatizacii-i-sistem-upravlen>. Text. Image: electronic. (In Russ.).

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7623

УДК 636.085.622; 631.363.21

Статья

Испытания центробежного измельчителя фуражного зерна

Абалихин Антон Михайлович

кандидат технических наук, доцент, Верхневолжский государственный агробиотехнологический университет (Российская Федерация), anton-abalikhin@yandex.ru

Барабанов Дмитрий Владимирович

научный сотрудник, Верхневолжский государственный агробиотехнологический университет (Российская Федерация), barabanov_dmitry@mail.ru

Крупин Александр Владимирович

кандидат технических наук, доцент, Верхневолжский государственный агробиотехнологический университет (Российская Федерация), kruvinav37@mail.ru

Муханов Николай Вячеславович

кандидат технических наук, доцент, Верхневолжский государственный агробиотехнологический университет (Российская Федерация), niket81@rambler.ru

Получена: 12 января 2023 / Принята: 8 мая 2024 / Опубликовано: 11 мая 2024

Аннотация: Измельчение фуражного зерна — одна из основных операций, необходимых для приготовления кормов. От качества зернового размола зависят правильная работа пищеварительной системы животных, их здоровье и продуктивность. Для измельчения фуражного зерна на большинстве предприятий агропромышленного комплекса применяют молотковые дробилки, опыт эксплуатации которых выявил недостаточную эффективность протекающего в них процесса измельчения. С целью повышения эффективности процесса измельчения фуражного зерна предложено использовать центробежный измельчитель, в котором реализована другая кинетика движения и протекает несколько иной процесс взаимодействия измельчаемого материала с активными и пассивными рабочими органами по сравнению с молотковыми дробилками. Представлено подробное описание и рассмотрен принцип работы центробежного измельчителя фуражного зерна. Для исследования работы центробежного измельчителя в производственных условиях была создана поточно-технологическая линия по переработке фуражного зерна. Представлена

схема и дано описание работы поточно-технологической линии по переработке фуражного зерна в производственных условиях, которая включает следующие основные элементы: шнек загрузочный; центробежный измельчитель; шнек выгрузной; смеситель; устройства контроля и регулирования. Изложена методика проведения экспериментальных исследований в производственных условиях с описанием последовательности и средств контроля выбранных режимных параметров; представлены формулы по определению исследуемых параметров, таких как производительность, потребляемая мощность, средний диаметр измельчённых частиц. Дано обоснование и представлен выбор основных режимных параметров и критериев, исследуемых при проведении экспериментов. Для выбора оптимального режима функционирования центробежного измельчителя фуражного зерна при измельчении зерна ячменя в производственных условиях представлен анализ данных, полученных в ходе лабораторных исследований. Установлено, что при частоте вращения ротора, равной 3500 мин^{-1} , и площади выгрузного окна оперативного бункера $0,001458 \text{ м}^2$ наблюдается наибольшая производительность центробежного измельчителя, а в совокупности с величиной потребляемой мощности и полученными размерами измельчённых частиц достигнута наилучшая эффективность процесса измельчения. По результатам проведённых исследований в лабораторных и производственных условиях представлен сравнительный анализ полученных данных и сделан вывод о возможности эксплуатации центробежного измельчителя на выбранном оптимальном режиме и при частоте вращения ротора, находящейся за пределами величины, необходимой для разрушения зерна. Произведён анализ полученных данных с указанием причин расхождения результатов, полученных при проведении экспериментов в лабораторных и производственных условиях.

Ключевые слова: фуражное зерно; центробежный измельчитель; зерновой размол; пылевидная фракция

DOI: UDK 636.085.622; 631.363.21

Article

Testing of a feed grain centrifugal shredder

Anton Abalikhin

D. Sc. in engineering, associate professor, Verkhnevolzhsk State University of Agronomy and Biotechnology (Russian Federation), anton-abalikhin@yandex.ru

Dmitry Barabanov

researcher, Verkhnevolzhsk State University of Agronomy and Biotechnology (Russian Federation), barabanov_dmitry@mail.ru

Aleksander Krupin

D. Sc. in engineering, associate professor, Verkhnevolzhsk State University of Agronomy and Biotechnology (Russian Federation), krupinav37@mail.ru

Nikolay Mukhanov

D. Sc. in engineering, associate professor, Verkhnevolzhsk State University of Agronomy and Biotechnology (Russian Federation), nikem81@rambler.ru

Received: 12 January 2023 / Accepted: 8 May 2024 / Published: 11 May 2024

Abstract: Grinding of feed grain is one of the main operations necessary for the preparation of feed. The proper functioning of the digestive system of animals, their health and productivity depend on the quality of grain grinding. To grind feed grain, most enterprises of the agro-industrial complex use hammer crushers; however, the operating experience has revealed lack of efficacy of their grinding process. In order to increase the efficiency of the feed grain grinding process, the authors propose to use a centrifugal shredder based on a different kinetics with a slightly different process of interaction between the crushed material and active and passive crushing members in comparison with those of hammer crushers. A detailed description is presented and the principle of operation of a centrifugal feed grain shredder is considered. To study the operation of the centrifugal shredder in working environment a production line for feed grain processing was created. The authors present a diagram and a description of the production line operation for feed grain processing in working environment, which includes the following main elements: a feed auger; a centrifugal shredder; an outfeed auger; a mixer; control and regulation devices. The authors describe the experiment conducted in working environment including the sequence and means of control of the selected operating parameters and present formulas to determine the studied parameters,

such as: productivity, power consumption, average diameter of crushed particles. The rationale for the choice of the main regime parameters and criteria studied during the experiments is presented. To select the optimal mode of operation of a centrifugal feed grain shredder when grinding barley grain in working environment, an analysis of data obtained during laboratory studies is presented. It was found that with a rotor rotation speed equal to 3500 min⁻¹ and an area of the discharge window of the operational hopper of 0,001458 m², the greatest productivity of the centrifugal shredder is observed, and in combination with the amount of power intake and the resulting sizes of crushed particles, the best efficiency of the grinding process is achieved. Based on the results of the research conducted in laboratory and working environment, a comparative analysis of the data obtained is presented. The authors conclude that operating a centrifugal shredder at the selected optimal mode and at a rotor speed that is beyond the value necessary for grain destruction is possible. The obtained data analysis indicated the reasons for the discrepancy of the results obtained during experiments in laboratory and working environment.

Keywords: feed grain; centrifugal shredder; grain grinding; pulverized fraction

1. Введение

Фуражное зерно — неотъемлемый компонент рационов кормления всех сельскохозяйственных животных и птицы. Оно входит в состав комбикормов или рассыпных многокомпонентных полнорационных кормовых смесей. Измельчение фуражного зерна — обязательная операция при приготовлении комбикормов и кормосмесей. При измельчении разрушается твёрдая оболочка зерна, многократно увеличивается площадь внешней поверхности частиц корма, облегчается разжёвывание корма животными, улучшаются условия его переваривания и повышается усвояемость питательных веществ.

Важным показателем качества измельчения является размер частиц полученного размола. Он должен быть не минимально возможным, а оптимальным для каждого вида и половозрастной группы животных — в соответствии с зоотехническими требованиями. Так, для поросят-сосунов оптимальный размер частиц размола составляет 0,5—0,8 мм, для поросят-отъёмышей — 0,9—1,1 мм, для других групп свиней — 1—1,4 мм, а для коров, нетелей, крупного рогатого скота (КРС) на откорме, а также взрослых овец и коз — 1,5—2 мм. Скармливание переизмельчённых кормов с большим содержанием пылевидной фракции опасно не только снижением усвояемости питательных веществ корма, но и может явиться причиной развития различных заболеваний желудочно-кишечного тракта и даже гибели животных [1], [2]. Скармливание животным зерна крупного помола приводит к снижению переваримости и усвояемости питательных веществ и, как следствие, к уменьшению продуктивности и увеличению удельных затрат на производство корма.

В процессе производства рассыпных и гранулированных комбикормов качество измельчения компонентов оказывает влияние на эффективность проведения последующих операций, таких как смешивание и гранулирование. Средний размер частиц размола влияет на продолжительность смешивания, коэффициент вариации состава смеси, крошимость гранул [3], [4].

Наибольшее распространение в настоящее время из существующих технических средств для измельчения фуражного зерна имеют молотковые дробилки различных конструкций и производительности. Все они, наряду с удобством эксплуатации, имеют общие недостатки, основными из которых являются высокая энергоёмкость измельчения и значительное содержание в зерновом размоле пылевидной фракции (10—20 % и более) при тонком помоле.

Альтернативой молотковым дробилкам являются центробежные измельчители, принцип действия которых отличается от молотковых дробилок тем, что измельчение зерна происходит не за счёт активных рабочих органов вращающегося ротора, а на периферийной поверхности — деке. Ротор представляет собой диск с лопатками или рёбрами и осуществляет функцию разгона зёрен до скорости, которая обеспечит их разрушение при ударе о поверхность деки. Анализ разрабатываемых рядом исследователей

центробежных измельчителей ударного действия [5—8] показывает, что они обладают некоторыми преимуществами в сравнении с молотковыми дробилками:

- более низкий удельный расход энергии;
- высокая энергонапряжённость в рабочей зоне за счёт минимального зазора между активными и пассивными рабочими органами, что обеспечивает высокую степень измельчения при сравнительно низкой металлоёмкости машины;
- получение продукта измельчения, форма частиц которого может быть вписана в куб, с меньшим содержанием пылевидной фракции;
- простое и эффективное воздействие на смещение границ гранулометрического состава продуктов измельчения путём изменения скорости вращения ротора за счёт использования решет с отверстиями и отбойников деки различных форм и размеров;
- наиболее простая конструкция ротора обуславливает более низкую стоимость его изготовления и меньшую трудоёмкость технического обслуживания машины.

В настоящее время центробежные измельчители для фуражного зерна не производятся серийно, но разрабатываются различными научными коллективами.

Цель исследования — провести сравнительную оценку показателей эффективности работы и качества получаемого зернового размола центробежного измельчителя фуражного зерна при испытаниях его в лабораторных и производственных условиях.

2. Материалы и методы

Разработанный авторами центробежный измельчитель [9], [10] содержит (фото 1) станину 1 с виброопорами, корпус рабочей камеры 2 со съёмной передней крышкой, к ней крепится горловина оперативного бункера 3, в верхней части которой установлена регулировочная заслонка, привод 4 (включает электродвигатель, клиноременную передачу и приводной вал в корпусе подшипников).

Передаточное число клиноременной передачи составило 0,767 — необходимо для достижения частоты вращения ротора, обеспечивающей скорость вылета измельчаемых частиц, достаточную для их разрушения.

В корпусе рабочей камеры 2 располагаются рабочие органы измельчителя, которые включают: ротор 5 с лопатками, деку 6 с отбойниками и решето 7. Дека и решето крепятся к кронштейнам 8.

Перед началом проведения экспериментов была произведена балансировка ротора измельчителя на рабочей частоте его вращения с помощью виброметра-балансировщика БАЛКОМ 1. В ходе предварительно проведённых лабораторных исследований работы центробежного измельчителя были определены рациональные режимы функционирования [11—13] в исследуемом диапазоне варьирования факторов. Возникла необходимость проверки полученных результатов. Для этого в СПК «Рассвет» Гаврилово-Посадского района Ивановской области были проведены испытания измельчителя в производственных условиях.

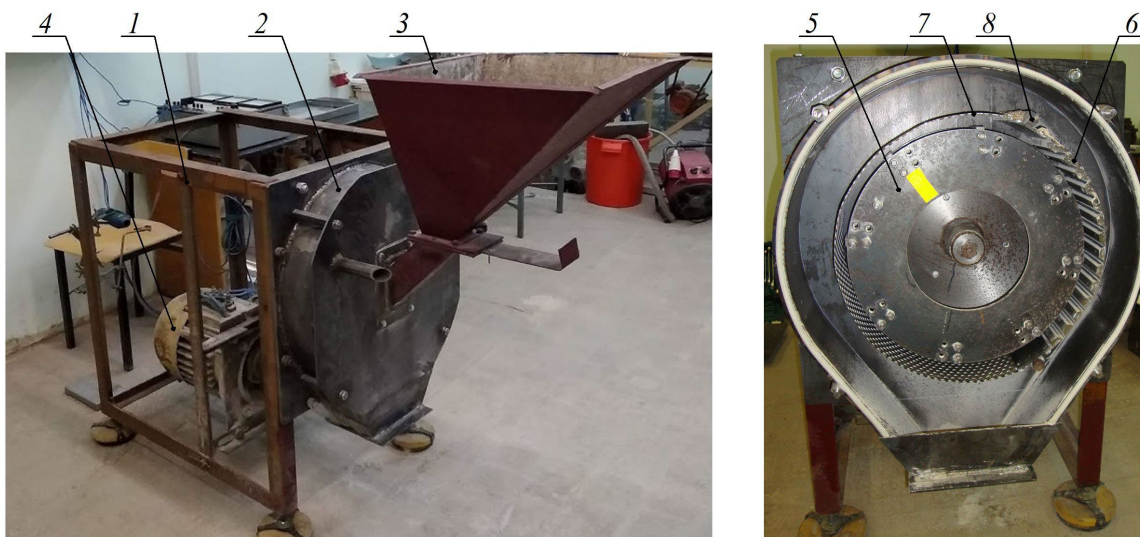


Фото 1. Устройство центробежного измельчителя: 1 — станина; 2 — корпус рабочей камеры; 3 — оперативный бункер; 4 — привод; 5 — ротор; 6 — дека; 7 — решето; 8 — кронштейн (фото авторов)

Photo 1. The device of the centrifugal shredder: 1 — the bed; 2 — the body of the working chamber; 3 — operational hopper; 4 — drive; 5 — rotor; 6 — deck; 7 — sieve; 8 — bracket

Для проведения испытаний измельчителя была собрана поточно-технологическая линия (фото 2) в следующем составе: загрузочный шнек 1, центробежный измельчитель 2, выгрузной шнек 3, смеситель ССК-0,6 4 с электронно-весовым устройством ЭВДУ-082 5, тензодатчики которого располагались под опорными плитами стоек смесителя. Для управления частотой вращения ротора электродвигателя измельчителя был использован регулятор частоты электрического тока Innovert ITD 113043В, расположенный в шкафу управления 6. В шкафу управления электродвигателем загрузочного шнека 7 располагался регулятор частоты электрического тока Powtran E3-9100-007Н. Запуск и остановку электродвигателей смесителя и выгрузного шнека производили с помощью электромагнитных пускателей, установленных в шкафу управления ПУ-2ф 8.

Электронно-весовое устройство 5 смесителя 4 было подключено к тензодатчикам и шкафу управления 8.

Для проведения испытаний измельчитель комплектовался решетом с диаметром отверстий 6 мм. Это обусловлено тем, что при использовании этого решета при проведении лабораторных испытаний измельчителя была достигнута наибольшая эффективность процесса измельчения зерна. В качестве материала для проведения испытаний использовалось фуражное зерно ячменя сорта «Сонет» влажностью 11,5 %.

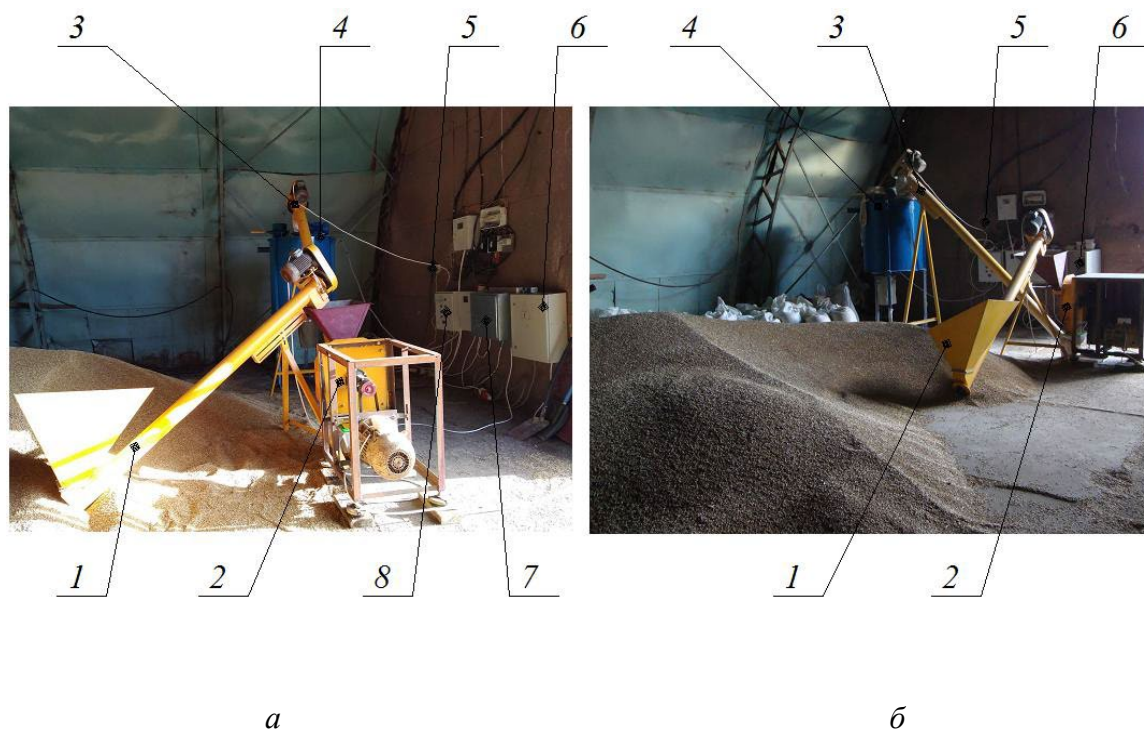


Фото 2. Поточно-технологическая линия для проведения испытаний центробежного измельчителя: *а* — главный вид; *б* — вид сбоку; 1 — шнек загрузочный; 2 — измельчитель центробежный; 3 — шнек выгрузной; 4 — смеситель ССК-0,6; 5 — электронно-весовое устройство ЭВДУ-082; 6 — шкаф управления электродвигателем измельчителя; 7 — шкаф управления электродвигателем загрузочного шнека; 8 — шкаф управления электродвигателями смесителя и электродвигателем выгрузного шнека ПУ-2ф (фото авторов)

Photo 2. Flow-processing line for testing a centrifugal shredder: (a) main view; (b) side view; 1 — feed auger; 2 — centrifugal shredder; 3 — outfeed auger; 4 — mixer SSK-0,6; 5 — electronic weighing device EVDU-082; 6 — control cabinet of the electric motor of the shredder; 7 — control cabinet of the electric motor of the feed auger; 8 — control cabinet of the electric motors of the mixer and the electric motor of the outfeed auger PU-2f

Производственные испытания проводились при полностью открытой регулировочной заслонке, при этом площадь выпускного окна оперативного бункера 3 (фото 1) максимальная и составила $F = 0,001458 \text{ м}^2$. Во время проведения производственных испытаний осуществлялась обратная последовательность включения в работу электродвигателей элементов поточно-технологической линии. При помощи пусковых кнопок шкафа управления 8 включались в работу электродвигатель смесителя 4, затем электродвигатель выгрузного шнека 3. Далее при помощи регулятора частоты электрического тока, установленного в шкафу управления 6, запускали электродвигатель центробежного

измельчителя, и устанавливали требуемую частоту вращения ротора 5 (фото 1) n , мин^{-1} . Исследования проводились при частоте вращения ротора измельчителя, равной: $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$ и $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$. В последнюю очередь запускали электродвигатель загрузочного шнека 1 регулятором частоты электрического тока, расположенным в шкафу 7, с помощью которого добивались необходимой подачи зернового материала. Во время проведения опытов фуражное зерно загружалось в приёмный бункер загрузочного шнека 1 (на фото 2 позицией не обозначен) вручную, откуда перемещалось в оперативный бункер 3 измельчителя (фото 1), далее самотёком поступало в корпус рабочей камеры 2 (фото 1), где измельчалось; выгрузным шнеком 3 измельчённое зерно подавалось в смеситель 4, рабочая ёмкость которого использовалась в качестве весового бункера; при помощи электронно-весового устройства 5 определялась масса порции измельчённого зерна. При измельчении каждой порции зерна секундомером контролировалось время измельчения, фиксировался потребляемый электродвигателем центробежного измельчителя ток, показания которого выводились на дисплее передней панели регулятора частоты электрического тока, установленного в шкафу 6.

Мощность, потребляемая измельчителем, определялась по следующей формуле:

$$N = \sqrt{3} \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi, \quad (1)$$

где I — сила тока по показаниям амперметра регулятора частоты электрического тока при стабильном режиме работы измельчителя, А; U — напряжение трёхфазной сети электрического тока, В; $U = 380 \text{ В}$; $\cos \varphi$ — коэффициент мощности электродвигателя, $\cos \varphi = 0,82$ — по технической характеристике электродвигателя ДМ132SA2, установленного на центробежном измельчителе.

Производительность измельчителя определялась по формуле

$$Q = 3600 \cdot m / t, \quad (2)$$

где Q — производительность измельчителя, кг/ч ; m — масса измельчаемой порции материала, кг ; t — время измельчения порции, с.

Из полученного зернового размола отбирались пробы из трёх разных порций, полученных при исследуемых частотах вращения ротора, затем проводился ситовой анализ. По результатам ситового анализа определялся средний размер частиц зернового размола по формуле

$$d_{\text{cp}} = \sum_{i=1}^n d_i \cdot p_i / 100 = (d_1 \cdot p_1 + d_2 \cdot p_2 + \dots + d_n \cdot p_n) / 100, \quad (3)$$

где d_i — средний размер отверстий двух смежных сит, мм ; p_i — весовой выход (масса класса), %.

При общей массе навески измельчённого материала, равной 100 г, суммарный весовой выход составляет: $\sum p_i = 100 \%$. Все значения полученных результатов были определены как среднее для трёх выполненных измерений.

3. Результаты

В результате проведённых предварительных исследований было установлено, что наиболее качественный размол зерна ячменя (с точки зрения качества получаемой зерновой дерти) получается при использовании решета с диаметром отверстий 6 мм [11]. Для оценки эффективности работы центробежного измельчителя и выбора наиболее оптимального режима его работы для проведения производственных испытаний были проведены лабораторные исследования, результаты которых представлены ниже.

Лабораторные исследования проводились при частотах вращения ротора $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$, $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$, $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$. Такой диапазон частот вращения был выбран ввиду того, что частота вращения пропорциональна скорости вылета измельчаемой частицы (скорости ударного нагружения) $v \text{ (м/с)}$ с лопатки ротора измельчителя, которая напрямую влияет на эффективность процесса измельчения. Многими исследователями установлено, что разрушение зернового материала в измельчителях ударного действия происходит при скорости ударного нагружения, которая лежит в диапазоне: $v = 60\text{—}100 \text{ м/с}$. Указанным значениям частоты вращения ротора, при известных его геометрических параметрах, соответствуют следующие величины скорости вылета измельчаемых зёрен с поверхности лопаток ротора: при $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$ — $v = 72,4 \text{ м/с}$; при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ — $v = 86,9 \text{ м/с}$; при $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$ — $v = 101,3 \text{ м/с}$. Отсюда следует, что при выбранных частотах вращения ротора будет происходить процесс измельчения зернового материала.

При проведении поисковых экспериментов в лабораторных условиях установлены следующие значения площади выпускного окна $F \text{ (м}^2\text{)}$ оперативного бункера: $F = 0,000702 \text{ м}^2$ — нижняя граница; $F = 0,00108 \text{ м}^2$; $F = 0,001458 \text{ м}^2$ — верхняя граница. При уменьшении площади выпускного окна до значений, меньших нижней границы, наблюдалось закономерное снижение производительности, что приводило к повышению энергоёмкости процесса измельчения. При увеличении площади выпускного окна оперативного бункера до значений, превышающих верхнюю границу, происходило уменьшение частоты вращения ротора с последующей аварийной остановкой — работа измельчителя невозможна. Результаты проведённых лабораторных экспериментов представлены на рисунках 1 и 2 в виде поверхностей отклика. На рисунке 1 показана зависимость производительности $Q \text{ (кг/ч)}$ измельчителя от частоты вращения ротора $n \text{ (мин}^{-1}\text{)}$ и площади выпускного окна $F \text{ (м}^2\text{)}$. На рисунке 2 показана зависимость потребляемой мощности $N \text{ (Вт)}$ электродвигателя измельчителя от частоты вращения ротора $n \text{ (мин}^{-1}\text{)}$ и площади выпускного окна $F \text{ (м}^2\text{)}$. Номинальная паспортная мощность электродвигателя ДМ132SA2 составляла: $N = 5500 \text{ Вт}$.

Для более полного понимания влияния исследуемых факторов на качество получаемой зерновой дерти в таблице 1 представлены значения среднего диаметра измельчённых частиц $d_{\text{ср}}$ (мм) в зависимости от частоты вращения ротора $n \text{ (мин}^{-1}\text{)}$ и площади выпускного окна оперативного бункера $F \text{ (м}^2\text{)}$.

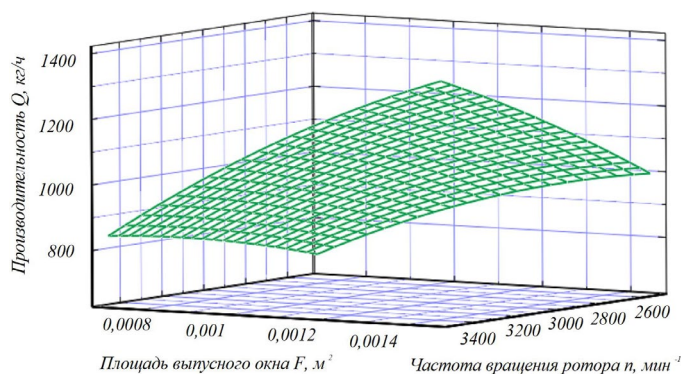


Рисунок 1. Зависимость производительности измельчителя от площади выпускного окна бункера и частоты вращения ротора (рисунок авторов)

Figure 1. The dependence of the productivity of the shredder on the area of the outlet window of the hopper and the speed of rotation of the rotor

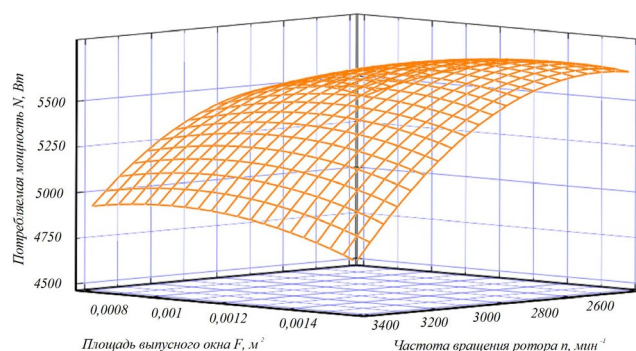


Рисунок 2. Зависимость потребляемой мощности от площади выпускного окна бункера и частоты вращения ротора (рисунок авторов)

Figure 2. The dependence of power intake on the area of the hopper outlet window and the speed of rotation of the rotor

Таблица 1. Значения среднего диаметра измельчённых частиц зерна в миллиметрах от исследуемых параметров работы центробежного измельчителя

Table 1. The values of the average diameter of the crushed grain particles in mm from the investigated parameters of the centrifugal shredder

Частота вращения ротора n , мин^{-1}	Площадь выпускного окна оперативного бункера F , м^2		
	0,001458	0,00108	0,000702
2500	2,532	2,37	2,278
3000	2,276	2,174	1,985
3500	1,958	1,95	1,795

Совместный анализ поверхностей (рисунки 3 и 4) и таблицы 1 показал следующее. Максимальная производительность составила: $Q = 1422$ кг/ч при частоте вращения ротора $n = 3500$ мин⁻¹ и площади выпускного окна оперативного бункера $F = 0,001458$ м² — *лучший результат*; при этом потребляемая мощность составила: $N = 5721$ Вт, что на 3,8 % превосходит номинальную мощность электродвигателя, — создается перегрузка. Средний диаметр измельчённых частиц составил: $d_{cp} = 1,958$ мм, что вполне укладывается в границы зоотехнических требований. Рассмотрим изменения значений производительности Q (кг/ч), мощности N (Вт) и среднего диаметра измельчённых частиц d_{cp} (мм) при уменьшении значений частоты вращения ротора n (мин⁻¹) и фиксированном значении площади выпускного окна оперативного бункера: $F = 0,001458$ м². При снижении частоты вращения ротора до $n = 3000$ мин⁻¹ производительность снизилась на 8 % и составила: $Q = 1299$ кг/ч. Потребляемая мощность снизилась на 1,5 % и составила: $N = 5691$ Вт, что также превосходит номинальную мощность электродвигателя на 3,4 %. Средний диаметр измельчённых частиц составил: $d_{cp} = 2,276$ мм, что на 12 % превышает значение верхней границы зоотехнических требований. При дальнейшем снижении частоты вращения ротора до $n = 2500$ мин⁻¹ по сравнению с лучшим результатом производительность снизилась на 27 % и составила: $Q = 1043$ кг/ч; значение потребляемой мощности снизилось на 2,4 % и составило: $N = 5655$ Вт — возникает перегрузка электродвигателя на 2,8 %. Средний диаметр измельчённых частиц $d_{cp} = 2,532$ мм по сравнению с лучшим результатом увеличился на 22,7 % и на 21,1 % превышает значение верхней границы зоотехнических требований. Далее представим результаты экспериментов для значения площади выпускного окна оперативного бункера: $F = 0,00108$ м² в сравнении с результатами, полученными для рассматриваемых значений частот вращения ротора n (мин⁻¹) и площади: $F = 0,001458$ м². При частоте вращения ротора $n = 3500$ мин⁻¹ производительность составила: $Q = 1317$ кг/ч, что меньше на 7,4 % по сравнению с аналогичным случаем с большей площадью выпускного окна оперативного бункера. Потребляемая мощность составила: $N = 5623$ Вт — снизилась по отношению к сравниваемому варианту на 1,8 %; перегрузка электродвигателя составила 2,8 %, в предыдущем варианте перегрузка была на 1 % больше. Средний диаметр измельчённых частиц $d_{cp} = 1,95$ мм; уменьшение по отношению к сравниваемому варианту составило 0,4 %, что незначительно. При частоте вращения ротора $n = 3000$ мин⁻¹ производительность $Q = 1039$ кг/ч; снижение значительное и составило 20 %. Потребляемая мощность снизилась на 1,5 % и составила: $N = 5606$ Вт; перегрузка электродвигателя составляет 1,9 %, что на 1,5 % меньше, чем в сравниваемом варианте. Средний диаметр измельчённых частиц уменьшился на 4,5 % и составил: $d_{cp} = 2,174$ мм. При частоте вращения ротора $n = 2500$ мин⁻¹ производительность измельчителя уменьшится на 21,3 % и составит: $Q = 821$ кг/ч. Значение потребляемой мощности составило: $N = 5586$ Вт — это на 1,3 % меньше, чем в сравниваемом варианте; перегрузка электродвигателя составила 1,6 %, что на 1,2 % меньше, чем в сравниваемом варианте. Величина среднего диаметра измельчённых частиц составила: $d_{cp} = 2,37$ мм — это на 6,4 % меньше, чем в сравниваемом

варианте, и на 25,7 % превосходит значение верхней границы зоотехнических требований. Дальнейшее исследование поверхностей (рисунки 3 и 4) показало, что при уменьшении площади выпускного окна оперативного бункера до $F = 0,000702 \text{ м}^2$ при известных значениях частоты вращения ротора n (мин^{-1}) производительность измельчителя изменялась в пределах: от $Q = 797 \text{ кг/ч}$ до $Q = 643 \text{ кг/ч}$ — это наименьшие значения. Потребляемая мощность изменялась в пределах от $N = 4936 \text{ Вт}$ до $N = 4432 \text{ Вт}$ — электродвигатель недогружен. Средний диаметр частиц измельчённого зерна варьировался в пределах от $d_{\text{ср}} = 1,795 \text{ мм}$ до $d_{\text{ср}} = 2,278 \text{ мм}$, что в большей степени соответствует зоотехническим требованиям. При данном положении регулировочной заслонки ($F = 0,000702 \text{ м}^2$) средняя производительность Q (кг/ч) снижается более чем в два раза, что приведёт к значительному повышению энергоёмкости процесса измельчения и увеличению периода функционирования центробежного измельчителя при переработке требуемого количества фуражного зерна. При двух других положениях регулировочной заслонки ($F = 0,001458 \text{ м}^2$ и $F = 0,00108 \text{ м}^2$) и заданных значениях частоты вращения ротора ($n = 3500 \text{ мин}^{-1}$, $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$, $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$) наблюдаются значительный разброс по производительности Q (кг/ч) и близкие по величине значения потребляемой мощности N (Вт) — электродвигатель всегда немного перегружен. При частотах вращения ротора $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$, $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$ величина среднего диаметра измельчённых частиц $d_{\text{ср}}$ (мм) выходит за пределы верхней границы зоотехнических требований, что недопустимо. При частоте вращения ротора $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$ и при положениях регулировочной заслонки, обуславливающих площадь выпускного окна оперативного бункера ($F = 0,001458 \text{ м}^2$ и $F = 0,00108 \text{ м}^2$), средний диаметр измельчённых частиц зерна $d_{\text{ср}}$ (мм) практически одинаковый, а значения входят в пределы границ зоотехнических требований. Но при $F = 0,001458 \text{ м}^2$ наблюдается максимальная производительность: $Q = 1422 \text{ кг/ч}$, следовательно, на данном режиме работы измельчителя, который ранее был определён как лучший результат, будет наблюдаться наименьшая энергоёмкость процесса измельчения, при этом можно считать, что процесс измельчения будет протекать наиболее эффективно, а режим работы — оптимальный.

Как было установлено ранее, при оптимальном режиме работы центробежного измельчителя создаётся перегрузка электродвигателя, равная 3,8 %. Возникает необходимость проверки работы измельчителя и качества получаемой зерновой дерти при указанной перегрузке электродвигателя с сохранением достигнутой производительности в производственных условиях при измельчении непрерывного потока зернового материала.

Анализ поверхностей (рисунки 3 и 4) наглядно указал на следующую закономерность: показатели эффективности работы измельчителя стабильно увеличивались с возрастанием частоты вращения ротора в исследуемом диапазоне. Справедливо было бы предположить, что при увеличении частоты вращения ротора до $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ возможен дальнейший рост показателей эффективности работы измельчителя. Поэтому часть зернового материала в ходе производственных испытаний была измельчена при частоте вращения ротора измельчителя $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$.

Для оценки эффективности работы центробежного измельчителя в лабораторных и производственных условиях в таблице 2 представлены значения производительности и потребляемой мощности. В таблице 3 отражены данные гранулометрического состава неизмельчённого зерна и зернового размола, полученные в ходе проведённого ситового анализа.

Таблица 2. Значения показателей эффективности работы центробежного измельчителя

Table 2. Values of performance indicators of the centrifugal shredder

Вид испытаний	Частота вращения ротора n , мин^{-1}	Производительность Q , кг/ч	Потребляемая мощность N , Вт
В лабораторных условиях	3500	1422	5721
В производственных условиях	3500	1343	6294
	4000	1392	6356

Таблица 3. Гранулометрический состав неизмельчённого зерна и зернового размола

Table 3. Granulometric composition of non-ground grain and grain grinding

Вид испытаний	Частота вращения ротора n, мин ⁻¹	Остаток на лабораторных ситах, %							Средний диаметр частиц d _{ср} , мм
		Диаметр отверстий лабораторных сит, мм							
		5	3	2	1	0,5	0,25	0	
Неизмельчённое зерно									
Лабораторные	—	0,73	96,23	2,57	0,37	0,01	0	0	3,96
Производственные	—	0,34	99,03	0,55	0,08	0	0	0	4,01
Зерновой размол									
Лабораторные	3500	0,11	11,98	32,56	37,03	30,87	6,17	1,87	1,958
Производственные	3500	0	6,42	28,1	44,43	7,35	9,02	4,68	1,721
Производственные	4000	0	3,96	20,85	46,28	8,51	12,26	8,14	1,504

Анализ данных таблиц 2 и 3 показал следующее. При частоте вращения ротора измельчителя $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$ в производственных условиях величина производительности Q (кг/ч) снизилась на 5,6 % (существенно) по сравнению с лабораторными условиями. При увеличении частоты вращения до $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ производительность Q (кг/ч) повысилась по сравнению с предыдущим вариантом на 3,6 %, а по сравнению с оптимальным режимом работы в лабораторных условиях снижение составило 2,2 %. При частоте вращения ротора $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$ в производственных условиях произошло увеличение потребляемой мощности N (Вт) на 9,1 %; перегрузка электродвигателя составила 12,7 %. При увеличении частоты вращения ротора до значения $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ по сравнению с предыдущим вариантом произошло увеличение потребляемой мощности N (Вт) на 1 %, а по сравнению с вариантом исследования в лабораторных условиях увеличение составило 10 %; перегрузка электродвигателя составила 13,5 %. Средний диаметр измельчённых частиц (таблица 3) d_{cp} (мм) в производственных условиях получился меньше на 12,1 %. При частоте вращения ротора $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ значение d_{cp} (мм) уменьшилось на 12,6 % (это закономерно) и на 23,2 % уменьшилось по сравнению с лабораторным экспериментом при частоте $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$. При сравнении данных ситового анализа результатов, полученных в лабораторных и производственных исследованиях, установлено следующее. Содержание неизмельчённых частиц на сите с отверстиями диаметром 5 мм: в производственных условиях 0 %; по зоотехническим требованиям допускается до 5 % — требование выполняется. Содержание неизмельчённых частиц на сите с отверстиями диаметром 3 мм: при частоте вращения ротора $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$ уменьшение составило в 1,87 раза; при частоте $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ уменьшение по сравнению с предыдущим вариантом составило в 1,62 раза; уменьшение по сравнению с вариантом исследования в лабораторных условиях в 3,03 раза закономерно. По зоотехническим требованиям остаток на сите с отверстиями диаметром 3 мм не должен превышать 25 % — требование в рассмотренных вариантах выполняется. Содержание пылевидной фракции по результатам производственных испытаний по сравнению с лабораторными при $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$ возросло в 2,5 раза; при $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ увеличилось в 4,35 раза, а по сравнению с предыдущим вариантом в производственных условиях увеличение частоты вращения ротора на 500 мин^{-1} приводит к возрастанию содержания пыли в 1,74 раза.

4. Обсуждение и заключение

В соответствии с требованиями межгосударственных стандартов (ГОСТ 9268-2015, ГОСТ 34109-2017, ГОСТ 10199-2017, ГОСТ 18221-2018) производится контроль качества измельчения зерна. Анализируя данные таблицы 3 и опираясь при этом на нормативы данных стандартов и вышеприведённые зоотехнические требования, можно сделать вывод, что полученный размол в рассматриваемых случаях соответствует требованиям для следующих видов и половозрастных групп животных: молочные коровы, нетели,

быки-производители, КРС на откорме, молодняк КРС до 18 месяцев, взрослые овцы и молодняк овец старше 4 месяцев, взрослые козы и молодняк коз старше 3 месяцев.

Совместный анализ данных таблиц 2 и 3 указал на различие результатов, полученных в лабораторных и производственных условиях при установленном оптимальном режиме работы центробежного измельчителя: частота вращения ротора $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$, площадь выпускного окна оперативного бункера $F = 0,001458 \text{ м}^2$. По результатам проведённых производственных исследований установлено, что производительность измельчителя $Q \text{ (кг/ч)}$ снизилась на 5,6 %; одновременно с этим произошло повышение потребляемой мощности $N \text{ (Вт)}$ на 9,1 %. При возрастании частоты вращения ротора до значения $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ наблюдалось увеличение производительности $Q \text{ (кг/ч)}$ на 3,6 %, что закономерно, и потребляемой мощности $N \text{ (Вт)}$ на 1 %, причём значение мощности лежит выше допустимого предела при эксплуатации электродвигателя. Также наблюдалось значительное возрастание содержания пылевидной фракции в 1,74 раза. Увеличение частоты вращения ротора измельчителя до $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ привело к повышению энергоёмкости процесса измельчения и увеличению содержания пылевидной фракции в продукте помола.

Подводя общий итог, необходимо отметить следующие причины расхождения показателей эффективности работы центробежного измельчителя при проведении экспериментов в производственных и лабораторных условиях. Перед проведением экспериментов в лабораторных и производственных условиях были осуществлены замеры влажности зерна, которые показали, что в хозяйстве показатель влажности зерна выше на 0,5 %, чем зерна, находящегося в лаборатории. Результат ситового анализа неизмельчённого зерна показал, что средний диаметр зерна в хозяйстве больше на 1,3 %. Перечисленные отличия говорят о том, что для измельчения зерна до необходимых размеров в производственных условиях необходимо потратить больше энергии, а если дополнительного подвода энергии не будет, то производительность измельчителя снизится. В нашем случае мы наблюдаем одновременные изменения этих показателей. При этом потребляемая мощность в производственных условиях увеличивалась с одновременным снижением производительности. На это повлияло различие в способах отвода измельчённого зерна от центробежного измельчителя, которые были реализованы в лабораторных и производственных условиях. При проведении исследований в лабораторных условиях выгрузка измельчённого зерна осуществлялась в прикреплённый к выгрузной горловине корпуса рабочей камеры фильтр-мешок, который во время работы измельчителя создавал незначительное сопротивление выходу воздуха. Во время проведения производственных испытаний измельчённое зерно через небольшую тканевую проставку из выгрузной горловины попадало в выгрузной шнек длиной 2,5 м, который перемещал материал в смеситель. В верхней части смесителя крепился фильтр-мешок, служащий для отвода воздуха, поступающего вместе с измельчённым зерном. Витки винта выгрузного шнека служили препятствием свободному выходу воздуха, создавая тем самым подпор воздуха в рабочей камере центробежного измельчителя. Из-за этого возрастала кратность

циркуляции измельчаемых частиц зерна в корпусе рабочей камеры (увеличилось время пребывания измельчаемых частиц в корпусе рабочей камеры измельчителя), что привело к снижению производительности Q (кг/ч) и значительному возрастанию содержания пылевидной фракции в зерновой дерти. Увеличение потребляемой мощности N (Вт) произошло ввиду возрастания числа взаимодействий измельчаемых частиц с активными и пассивными рабочими органами. Всё вышеперечисленное привело к снижению эффективности процесса измельчения фуражного зерна в центробежном измельчителе при проведении производственных испытаний по сравнению с испытаниями в лабораторных условиях. Для повышения эффективности процесса измельчения при использовании центробежного измельчителя в составе поточно-технологической линии необходимо обеспечить отвод воздуха, предусмотрев на выходе из корпуса рабочей камеры разгрузительное устройство с фильтром, или использовать для отвода измельчённого зерна пневмоконвейер всасывающего типа.

Сравнительная оценка показателей эффективности работы и качества полученного зернового размола указала на некоторое различие результатов, полученных в ходе проведения экспериментов центробежного измельчителя в производственных и лабораторных условиях на установленном оптимальном режиме работы. При анализе полученных данных были определены причины их расхождения. Повышение частоты вращения ротора с $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$ до $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ привело к росту производительности Q (кг/ч) и потребляемой мощности N (Вт), а следовательно, увеличению энергоёмкости процесса измельчения. Вместе с тем произошло снижение качества зернового размола из-за значительного повышения содержания пылевидной фракции. Перечисленное привело к снижению эффективности процесса измельчения при частоте вращения ротора $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$.

Исследование выполнено в рамках научно-технической программы 122041300126-6 «Разработка перспективных технических средств, обеспечивающих интенсификацию и ресурсосбережение послеуборочной доработки и переработки фуражного зерна» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на 2023—2025 гг.

Список литературы

1. Providing for quality grinding grain for the implementation of the biological potential of productive animals / A. T. Lebedev, R. V. Pavlyuk, A. V. Zaharin [et al.] // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2016. Vol. 7, no. 2. P. 1525—1528. EDN NNJJCL.
2. Investigations in feeding device of grain crusher / P. Savinyh, V. Kazakov, A. Moshonkin [et al.] // Engineering for Rural Development, Jelgava, 22—24 May 2019 years. Jelgava, 2019. Vol. 18. P. 123—128. DOI: 10.22616/ERDev2019.18.N165. EDN TMYVNW.
3. Рюле М. Как изменяется размер частиц при гранулировании // Комбикорма. 2020. № 6. С. 34—36. EDN CCZYPO.

4. Diet mixing time affects nursery pig performance / C. N. Groesbeck, R. D. Goodband, M. D. Tokach [et al.] // *Journal of Animal Science*. 2007, July. Vol. 85, issue 7. P. 1793—1798. DOI: 10.2527/jas.2007-0019.
5. Studies of a Rotary-Centrifugal Grain Grinder Using a Multifactorial Experimental Design Method / A. Marczuk, A. Blicharz-Kania, P. A. Savinykh [et al.] // *Sustainability*. 2019. Vol. 11, no. 19. P. 5362. DOI: 10.3390/su11195362. EDN ITXUKG.
6. Исследование показателей работы роторно-центробежного измельчителя / А. Ю. Исупов, И. И. Иванов, Ю. А. Плотникова [и др.] // *АгроЭкоИнженерия*. 2021. № 3 (108). С. 90—99. DOI: 10.24412/2713-2641-2021-3108-90-99. EDN TYAVLX.
7. Обзор измельчителей центробежно-роторного принципа действия / М. К. Сердалин, А. С. Бардола, Т. А. Кине [и др.] // *Научное и техническое обеспечение АПК, состояние и перспективы развития: Материалы V междунар. научно-практич. конф., Омск, 29 апр. 2021 года*. Омск: Омский государственный аграрный университет им. П. А. Столыпина, 2021. С. 112—117. EDN SJUTWE.
8. Сухопаров А. И., Иванов И. И., Плотникова Ю. А. Влияние конструктивных параметров центробежно-роторного измельчителя на качественные показатели его работы // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2021. № 3 (64). С. 106—114. DOI: 10.24411/2078-1318-2021-3-106-114. EDN MLNHAЕ.
9. Патент на полезную модель № 189365. Российская Федерация. Центробежный измельчитель фуражного зерна / А. М. Абалихин, А. В. Крупин, Т. А. Жукова, Е. А. Долгова; опубл. 21.05.2019. Бюл. № 15. EDN FYQСТН.
10. Патент на изобретение № 2752143. Российская Федерация. Центробежный измельчитель сыпучих сельскохозяйственных материалов / М. С. Волхонов, А. М. Абалихин, А. В. Крупин; опубл. 23.07.2021. Бюл. № 21. EDN JСNIX.
11. Волхонов М. С., Абалихин А. М., Крупин А. В. Анализ эффективности работы нового измельчителя фуражного зерна // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2020. № 60. С. 124—131. DOI: 10.24411/2078-1318-2020-13124. EDN SJAXUG.
12. Studying The Operational Efficiency of The Centrifugal Impact Feed Grain Crusher of The New Design / M. Volkhonov, A. Abalikhin, A. Krupin [et al.] // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 5, no. 1 (107). P. 44—51. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.212994. EDN WAKJCE.
13. Определение оптимальных режимов работы центробежного измельчителя фуражного зерна / М. С. Волхонов, А. М. Абалихин, Д. В. Барабанов [и др.] // *Аграрная наука*. 2023. № 6. С. 111—115. DOI: 10.32634/0869-8155-2023-371-6-111-115. EDN YBKWVP.

References

1. Lebedev A. T., Pavlyuk R. V., Zaharin A. V., Lebedev P. A. Providing for quality grinding grain for the implementation of the biological potential of productive animals. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 2016, vol. 7, no. 2, pp. 1525—1528. EDN NNJCL.
2. Savinyh P., Kazakov V., Moshonkin A., Ivanov S. Investigations in feeding device of grain crusher. *Engineering for Rural Development, Jelgava, 22—24 May 2019 years*. Jelgava, 2019, vol. 18, pp. 123—128. doi: 10.22616/ERDev2019.18.N165. EDN TMYVNW.
3. Ryule M. How the particle size changes during granulation. *Compound feed*, 2020, no. 6, pp. 34—36. EDN CCZYPO. (In Russ.)

4. Groesbeck C. N., Goodband R. D., Tokach M. D., Dritz S. S., Nelssen J. L., De Rouchey J. M. Diet mixing time affects nursery pig performance. *Journal of Animal Science*, 2007, July, vol. 85, issue 7, pp. 1793—1798. doi: 10.2527/jas.2007-0019.
5. Marczuk A., Blicharz-Kania A., P. A. Savinykh [et al.] Studies of a Rotary-Centrifugal Grain Grinder Using a Multifactorial Experimental Design Method. *Sustainability*, 2019, vol. 11, no. 19, pp. 5362. doi: 10.3390/su11195362. EDN ITXUKG.
6. Isupov A. Yu., Ivanov I. I., Plotnikova Yu. A., Sukhoparov A. I. Investigation of the performance indicators of a rotary-centrifugal shredder. *Agroecoengineering*, 2021, no. 3 (108), pp. 90—99. doi: 10.24412/2713-2641-2021-3108-90-99. EDN TYAVLX. (In Russ.)
7. Serdalin M. K., Bardola A. S., Kine T. A., Sabiev U. K. Review of shredders of centrifugal — rotary principle of action. *Scientific and technical support of agroindustrial complex, state and prospects of development : materials of the V International scientific and practical conference, Omsk, April 29, 2021*. Omsk, Omsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin, 2021, pp. 112—117. EDN SJUTWE. (In Russ.)
8. Sukhoparov A. I., Ivanov I. I., Plotnikova Yu. A. Influence of design parameters of a centrifugal-rotary shredder on the quality indicators of its operation. *Proceedings of the Saint Petersburg State Agrarian University*, 2021, no. 3 (64), pp. 106—114. doi: 10.24411/2078-1318-2021-3-106-114. EDN MLNHAЕ. (In Russ.)
9. Abalikhin A. M., Krupin A. V., Zhukova T. A., Dolgova E. A. Utility Model Patent No. 189365. Russian Federation. Centrifugal shredder of feed grain. Publ. 21.05.2019. Bul. No. 15. EDN FYQCTH. (In Russ.)
10. Volkhonov M. S., Abalikhin A. M., Krupin A. V. Patent for invention No. 2752143. Russian Federation. Centrifugal shredder of bulk agricultural materials. Publ. 23.07.2021. Bul. No. 21. EDN JICNIX. (In Russ.)
11. Volkhonov M. S., Abalikhin A. M., Krupin A. V. Analysis of the efficiency of the new feed grain shredder. *Izvestiya of the Saint Petersburg State Agrarian University*, 2020, no. 60, pp. 124—131. doi: 10.24411/2078-1318-2020-13124. EDN SJAXUG. (In Russ.)
12. Volkhonov M., Abalikhin A., Krupin A., Maksimov I. Studying The Operational Efficiency of The Centrifugal Impact Feed Grain Crusher of The New Design. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, vol. 5, no. 1 (107), pp. 44—51. doi: 10.15587/1729-4061.2020.212994. EDN WAKJCE.
13. Volkhonov M. S., Abalikhin A. M., Barabanov D. V., Krupin A. V., Mukhanov N. V. [et al.]. Determination of optimal modes of operation of centrifugal fodder grain grinder. *Agrarian Science*, 2023, no. 6, pp. 111—115. doi: 10.32634/0869-8155-2023-371-6-111-115. EDN YBKWVP. (In Russ.)

УДК 630*

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7563

Статья

Технологический анализ вариантов использования валочно-трелёвочно-процессорных машин

Куницкая Ольга Анатольевна

доктор технических наук, профессор, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), ola.ola07@mail.ru

Кривошеев Андрей Александрович

аспирант, Ухтинский государственный технический университет (Российская Федерация), ugtukrivosheev@mail.ru

Швецов Александр Сергеевич

начальник учебной лаборатории 2-й кафедры боевого применения авиационного вооружения, Филиал Военного учебно-научного центра военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» в г. Сызрань (Российская Федерация), Kapitan2304@yandex.ru

Григорьева Ольга Ивановна

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова (Российская Федерация), grigoreva_o@list.ru

Макуев Валентин Анатольевич

доктор технических наук, профессор, Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана (Мытищинский филиал) (Российская Федерация), makuev@mgul.ac.ru

Ревяко Сергей Иванович

кандидат технических наук, доцент, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт, Донской государственный аграрный университет (Российская Федерация), revyako77@mail.ru

Получена: 21 ноября 2023 / Принята: 21 мая 2024 / Опубликовано: 28 мая 2024

Аннотация: Для мелких и малообъёмных лесозаготовительных предприятий, которые преобладают в лесном комплексе Российской Федерации, в условиях острого дефицита вальщиков леса универсальные лесозаготовительные машины

(одномашинные лесозаготовительные комплексы) являются одним из наиболее предпочтительных вариантов для проведения лесосечных работ, как при сплошных, так и при выборочных рубках леса. По сравнению с классическими многомашинными лесозаготовительными комплексами (например, харвестер и форвардер) они требуют значительно меньше капиталовложений, операторов, затрат на их перемещение с лесосеки на лесосеку, что при дефрагментированном лесосечном фонде (с преобладанием небольших по площади и ликвидному запасу древесины лесосек), свойственном для таких предприятий, является достаточно значимым фактором. В статье выполнен технологический анализ четырёх вариантов использования валочно-трелёвочно-процессорных машин. Рассмотрены технологические схемы разработки лесосек при помощи этих машин. Рассмотрены варианты использования этих универсальных лесозаготовительных машин при включении их в состав многомашинных лесозаготовительных комплексов, в случае необходимости — значительного увеличения объёма заготовки древесины за единицу времени. Показано, что валочно-трелёвочно-процессорные машины имеют большую вариативность технологического использования, в частности, в том, что они могут быть задействованы как на скандинавской, так и на канадской технологии лесосечных работ.

Ключевые слова: лесосечные работы; системы машин для лесосечных работ; одномашинные лесозаготовительные комплексы; лесозаготовительные машины; машинная заготовка древесины

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7563

Article

Technological analysis of felling-skidding-processing machines usage

Olga Kunitskaya

D. Sc. in engineering, professor, Arctic State Agrotechnological University (Russian Federation), ola.ola07@mail.ru

Andrey Krivosheev

Ph. D. student, Ukhta State Technical University (Russian Federation), ugtukrivosheev@mail.ru

Alexander Shvetsov

Head of the Training Laboratory of the 2nd Department of Combat Use of Aviation Weapons, Branch of the Military Training and Research Center of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin» in Syzran (Russian Federation), Kapitan2304@yandex.ru

Olga Grigoreva

Ph. D. in agriculture, associate professor, Saint Petersburg State Forest Engineering University named after S. M. Kirov (Russian Federation), grigoreva_o@list.ru

Valentin Makuev

D. Sc. in engineering, professor, Bauman Moscow State Technical University (Mytishchi Branch) (Russian Federation), makuev@mgul.ac.ru

Sergey Revyako

Ph. D. in engineering, associate professor, Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute, Don State Agrarian University (Russian Federation), revyako77@mail.ru

Received: 21 November 2023 / Accepted: 21 May 2024 / Published: 28 May 2024

Abstract: For small and low-volume logging enterprises that predominate in the forest complex of the Russian Federation, in conditions of an acute shortage of forest fellers, universal logging machines (single-machine logging complexes) are one of the most preferred options for carrying out logging operations, both in clear felling and selective logging. Compared with multi-machine logging complexes, for example, harvester and forwarder, they require significantly less capital investment, operators, and the cost of

moving them from one cutting area to another. The latter is quite a significant factor because of a defragmented cutting fund (with a predominance of small-area and realizable wood volume of cutting areas), characteristic of such enterprises. The article presents a technological analysis of four options for using felling-skidding-processing machines. Technological schemes for the development of cutting areas using these machines are considered. The options of using these universal logging machines are considered when they are included in the structure of multi-machine logging complexes, if it is necessary to increase significantly the volume of wood harvesting per unit of time. It is shown that felling-skidding-processing machines have a great variability of technological use, in particular, they may be used both on Scandinavian and Canadian technology of logging operations.

Keywords: logging operations; systems of machines for logging operations; single-machine logging complexes; logging machines; machine harvesting of wood

1. Введение

Санкции западных стран против Российской Федерации существенно затронули и лесной комплекс нашей страны. Пятый пакет санкций вызвал уход с российского рынка очень многих производителей лесных машин и оборудования. Это привело к удорожанию и усложнению логистики получения необходимых оригинальных запасных частей и расходных материалов, а также обновления парка машин.

Завод «Амкодор-Онего» ещё только выходит на производственные мощности, а гусеничные харвестеры, на базе экскаваторов с китайскими харвестерными головками, далеко не полностью могут решить возникшую проблему дефицита лесных машин [1], [2].

Кроме того, эмбарго на поставку древесины в западные страны привело к переизбытку производства изделий из древесины и, соответственно, снижению внутреннего спроса на круглые лесоматериалы, что, в свою очередь, способствовало снижению объёмов заготовки древесины.

При небольших объёмах заготовки древесины, часто в условиях сильно дефрагментированного лесосечного фонда, включающего разрозненные, небольшие по площади и запасу ликвидной древесины лесосеки, использование высокопроизводительных машинных комплексов [например, валочно-пакетирующая машина (ВПМ) + скиддер + процессор или харвестер + форвардер] не имеет никакого экономического смысла, поскольку большую часть времени эти достаточно дорогие машины будут простаивать и приносить убыток, а не доход [3—5].

Традиционно малообъёмные лесозаготовки ориентированы на сортиментную механизированную заготовку древесины, которую осуществляют вальщики леса при помощи бензиномоторных пил [6]. Они могут работать по скандинавской технологии (под форвардер), производя валку деревьев, обрезку сучьев и раскряжёвку на пасеке, после чего форвардер собирает заготовленные сортименты, трелюет их на погрузочный пункт и раскладывает в соответствующие штабели групп сортировки [7], [8]. Также они могут работать по технологии с трелёвкой хлыстов, когда на пасеке производится валка деревьев вершинами на волок, обрезка сучьев с укладкой кроновой части на трелёвочные волока, последующая трелёвка хлыстов за вершины и их раскряжёвка на верхнем складе бензиномоторными пилами на разделочно-раскаточной эстакаде, с последующей раскаткой и укладкой в соответствующие штабели групп сортировки [9]. Менее распространён, но достаточно известен вариант, когда после механизированной валки деревьев на пасеках их трелюют за комли на верхний склад, на котором установлен делимбер для обрезки сучьев, а далее на разделочно-раскаточной эстакаде выполняется раскряжёвка хлыстов бензиномоторными пилами, с последующей раскаткой и укладкой в соответствующие штабели групп сортировки [10]. Также известен, но практически не встречается в практике отечественных лесозаготовительных предприятий вариант, когда после механизированной валки деревьев их дальнейшая обработка — обрезка сучьев и раскряжёвка стволов

на сортименты (на пасеке или на верхнем складе) — производится при помощи мобильных сучкорезно-раскряжёвочных машин (процессоров).

Все эти варианты технологического процесса лесосечных работ требуют, как минимум, 3—4 рабочих — вальщиков леса, операторов, при достаточно низкой выработке на человеко-день, не сравнимой с выработкой оператора лесозаготовительной машины.

Также необходимо учитывать достаточно серьёзный кадровый дефицит рабочих на лесозаготовительных предприятиях, связанный, прежде всего, со старением уже работающих сотрудников, непопулярностью рабочих лесозаготовительных профессий у молодёжи, вкупе с очень существенным оттоком с лесозаготовительных предприятий гастарбайтеров, особенно по сравнению с 2008 г. [11].

В таких условиях одним из наиболее рациональных решений является использование одномашинных лесозаготовительных комплексов — универсальных лесозаготовительных машин, которые обеспечивают и валку деревьев, и производство из них сортиментов, и трелёвку на верхний склад или погрузочный пункт, а также укладку сортиментов в соответствующие штабели групп сортировки.

Надо отметить, что далеко не все производители лесных машин и оборудования ушли с российского рынка, «громко хлопнув дверью», как, например, это сделала финская компания Ponsse. Более того, понимая огромные перспективы российского рынка, некоторые достаточно новые для нашей страны компании-производители лесных машин приходят на наш рынок в современный, непростой период, рассчитывая занять его значительную долю.

Одной из таких организаций является австрийская машиностроительная компания Konrad Forsttechnik, специализирующаяся на производстве машин и оборудования для лесосечных работ. В настоящее время интересы Konrad Forsttechnik в России представляет ООО «КОНРАД РУССЛАНД», которое занимается поставкой и продвижением оборудования Konrad Forsttechnik в нашей стране.

2. Материалы и методы

Если изучить сайт компании Konrad Forsttechnik, то линейка выпускаемых фирмой лесных машин и оборудования достаточно обширна, причём со специализацией на заготовку древесины на склонах. Поэтому в линейку продукции компании входят элементы самоходных канатных трелёвочных установок, горные процессоры, харвестер на экскаваторной базе (KDH40-1), харвестерные головки. И наиболее интересные для российского рынка в настоящее время — валочно-трелёвочно-процессорные машины (ВТПМ) HIGHLANDER HL10-2 [с колёсной формулой 4к4 (фото 1)] и HIGHLANDER HL20-2 [с колёсной формулой 6к6 (фото 2)]. Из названия этих машин видно, что они, как и практически вся продукция компании, предназначены для заготовки древесины на склонах.

Для работы в условиях склонов у данных машин хорошо приспособлена трансмиссия, а также может быть установлена лебёдка, помогающая работать на особенно крутых склонах [12]. Но возможно приобретение такой машины и только для равнинных условий (без лебёдки), что снижает массу машины, и особенно её стоимость, примерно на 20—25 %.



Фото 1. ВТПИМ HIGHLANDER HL10-2 (фото авторов)

Photo 1. Felling-skiidding-processing machine HIGHLANDER HL10-2



Фото 2. ВТПИМ HIGHLANDER HL20-2 (фото авторов)

Photo 2. Felling-skiidding-processing machine HIGHLANDER HL20-2

Необходимо отметить, что практически полный развал отечественного лесного машиностроения, произошедший в XXI в., безусловно, сыграл на руку иностранным компаниям-производителям лесных машин и оборудования, практически на 100 % занявшим российский рынок. Ликвидация отечественных предприятий лесного машиностроения, на фоне совершенно неэффективных мероприятий по их поддержке, привела к ликвидации профильных НИИ и КБ, утере бесценного кадрового ресурса, который очень остро ощущается в настоящее время [13].

При этом в немногочисленных отечественных научных школах в области лесного комплекса, сосредоточенных в вузах, не прекращались работы по разработке высокоэффективных концептов, в т. ч. и универсальных лесозаготовительных машин, к которым относится и ВТПМ.

Рассматривая вопросы эффективной эксплуатации ВТПМ, нельзя не отметить концепт, разработанный в Петрозаводском государственном университете под руководством доктора технических наук, профессора Ильи Романовича Шегельмана [14—17]. В частности, П. В. Будником, аспирантом И. Р. Шегельмана, в 2011 г. была защищена кандидатская диссертация на тему «Обоснование технологических решений, повышающих эффективность заготовки сортиментов и лесосечных отходов, на основе функционально-технологического анализа», в которой обоснованы концепты ВТПМ на колёсной и гусеничной базах тракторов Онежского тракторного завода (ОТЗ) (рисунки 1 и 2).

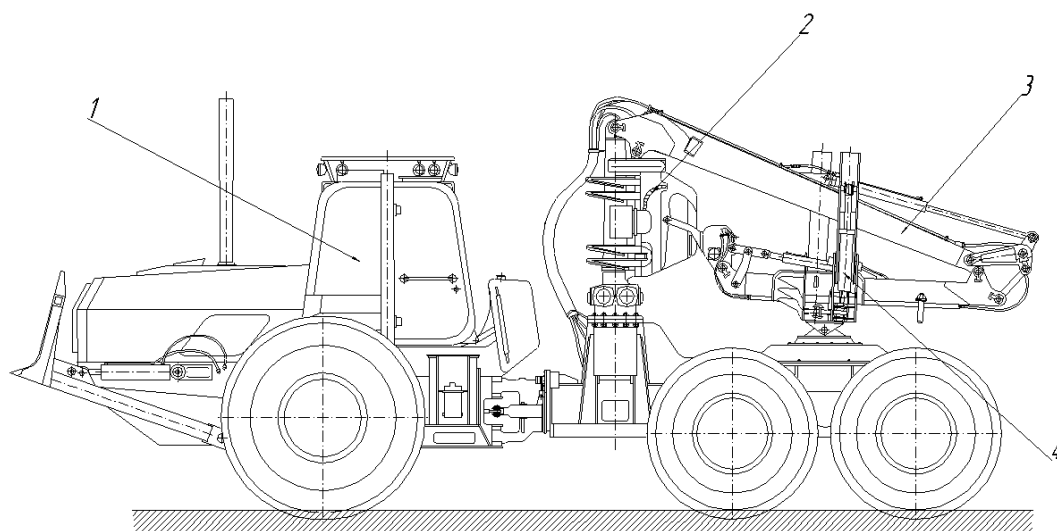


Рисунок 1. Компоновочная схема ВТПМ на колёсной базе ТЛК6-02: 1 — колёсное шасси; 2 — харвестерная головка; 3 — гидроманипулятор; 4 — кониковый зажим [14]

Figure 1. Layout diagram in the felling-skidding-processing machine on the wheelbase TLK 6-02: 1 — wheeled chassis; 2 — harvester head; 3 — hydraulic manipulator; 4 — conical clamp [14]

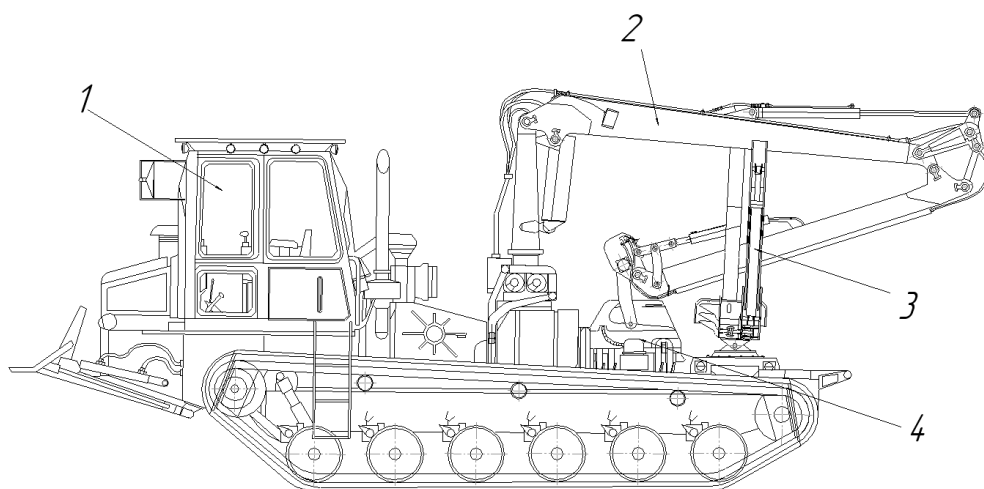


Рисунок 2. Компоновочная схема ВТПМ на гусеничной базе МЛ-107: 1 — гусеничное шасси; 2 — гидроманипулятор; 3 — кониковый зажим; 4 — харвестерная головка [14]

Figure 2. Layout diagram of felling-skidding-processing machine on the ML-107 caterpillar base: 1 — tracked chassis; 2 — hydraulic manipulator; 3 — conical clamp; 4 — harvester head [14]

К великому сожалению, на тот момент Онежский тракторный завод уже находился на грани банкротства и в производство представленные на рисунках 1 и 2 концепты не пошли. Хотя представленные колёсная база и гусеничная база выпускались, а приобрести харвестерные головки к ним большой проблемой не являлось.

Зарубежное лесное машиностроение, в подавляющем большинстве, базировалось и базируется на модульных колёсных шасси, соединённых универсальным шарниром (рисунок 1). Компоновочная схема трансмиссии ВТПМ компании Konrad Forsttechnik отличается тем, что вместе с универсальным шарниром для поворота машины используется крабовый ход.

В диссертации П. В. Будника, помимо самих концептов ВТПМ на колёсном и гусеничном шасси, были обоснованы оптимальный вылет её гидроманипулятора, оптимальная мощность двигателя, массы трелюемой пачки лесоматериалов для различных природно-производственных условий лесных регионов Российской Федерации.

Отметим, что в классическом варианте использования ВТПМ валит деревья, двигаясь в сторону верхнего склада, формирует пачку в кониковом зажиме, производя трелёвку в полупогруженном положении за комли, т. к. вершинная часть пачки деревьев не позволит уложить её в коник и зажать. После набора полновесной пачки ВТПМ перемещается с ней на площадку верхнего склада, где поштучно выгружает из коника деревья, производит обрезку сучьев, раскряжёвку и укладку сортиментов в соответствующие штабели групп сортировки.

3. Результаты

При сплошной рубке без сохранения подроста главных пород ВТПМ может успешно работать по классическим схемам работы валочно-трелёвочных машин (ВТМ) (рисунок 3).

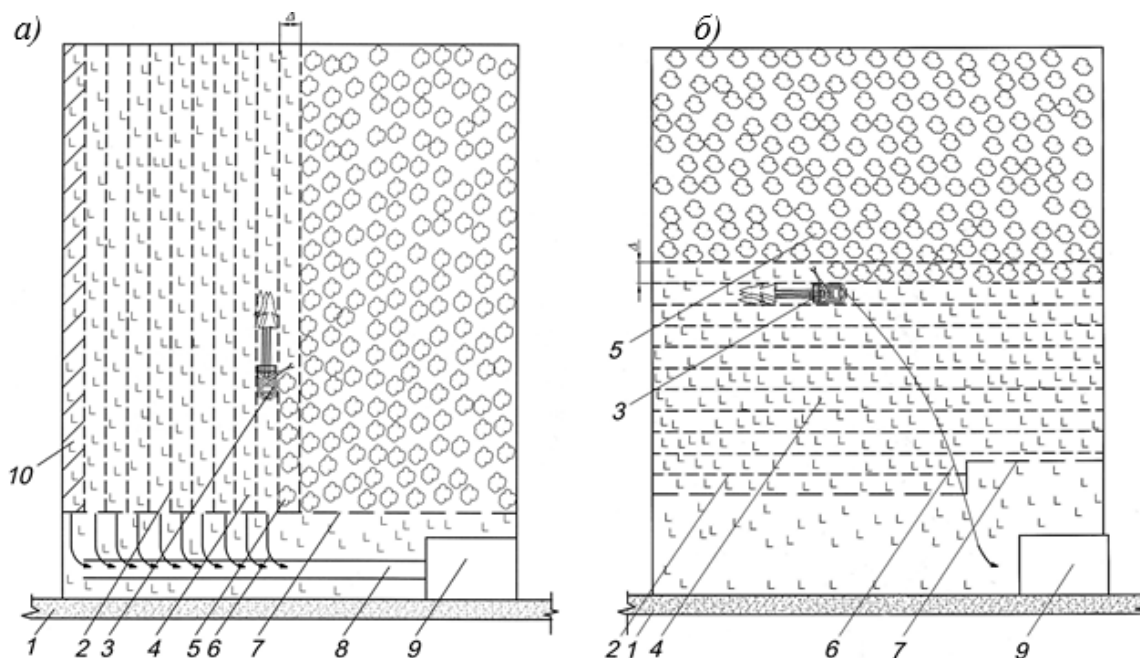


Рисунок 3. Схемы разработки лесосек ВТПМ при сплошной рубке: *а* — лентами, перпендикулярными лесовозному усу; *б* — лентами, параллельными лесовозному усу; 1 — лесовозный ус; 2 — ленты; 3 — ВТПМ; 4 — пни; 5 — растущий лес; 6 — рейсы ВТПМ; 7 — зона безопасности; 8 — магистральный трелёвочный волок; 9 — верхний склад, 10 — холостой волок; Δ — ширина разрабатываемой ленты [18]

Figure 3. Schemes for cutting areas development using felling-skidding-processing machines in case of clear felling: **(a)** bands perpendicular to the logging spur; **(b)** bands parallel to the logging spur; 1 — logging spur, 2 — bands; 3 — felling-skidding-processing machine; 4 — stumps; 5 — growing forest; 6 — VTPM passages; 7 — safety zone; 8 — trunk skidding trail, 9 — upper warehouse, 10 — idle trail; Δ — width of the developed band [18]

Схемы разработки лесосеки ВТПМ, представленные на рисунке 3, можно рекомендовать, как и для случая использования валочно-трелёвочных машин ВТМ, при работе на лесосеках на почвогрунтах с хорошей несущей способностью летом, при неглубоком снеге зимой. При почвогрунтах III категории летом, глубоком снеге зимой желательны ленты разработки пасек прокладывать под углом 60—70° к магистральному трелёвочному волоку, чтобы облегчить машине выезд на него и заезд на верхний склад [19].

Также в диссертации П. В. Будника рассмотрены варианты работы ВТПМ по узкопасечной технологии при рубке с сохранением подроста, с предварительной разрубкой пасечного волока (рисунок 4).

В таком варианте работы ВТПМ сначала, двигаясь задним ходом от уса лесовозной дороги, прорубает трассу пасечного трелёвочного волока, укладывая сваленные деревья сбоку, на краю волока. Прорубив волок, машина движется по нему в сторону лесовозного уса, собирает ранее поваленные деревья и валит деревья на полупасеках. При этом деревья, срезанные на полупасеке, валятся вершинами на волок, при удержании комлевой части в харвестерной головке. После падения вершины дерева на волок комлевая часть переносится в харвестерной головке над подростом, не повреждая его.

Варианты работы ВТПМ, представленные на рисунках 3 и 4, не отличаются от классических схем разработки лесосек при помощи широкозахватных ВТМ, поскольку для верхнего склада не отличаются и технологии их работы.

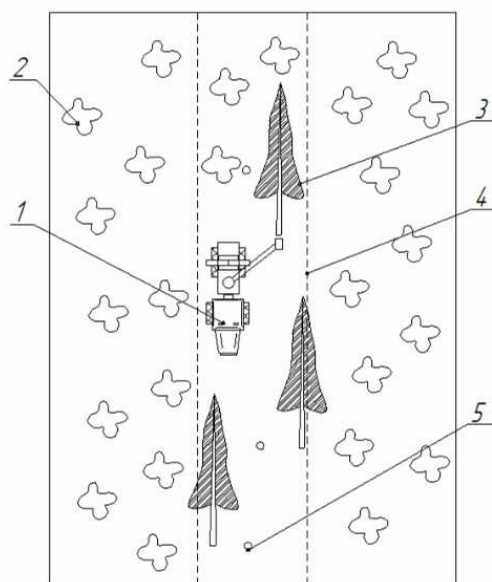


Рисунок 4. Схема рубки трассы пасечного волока ВТПМ при узкопасечной технологии при рубке с сохранением подроста: 1 — ВТПМ; 2 — стоящее дерево; 3 — поваленное дерево; 4 — граница волока; 5 — пень [14]

Figure 4. The scheme of cutting the route of the skidding trail in cutting strip using a felling-skidding-processing machine with narrow-strip technology when cutting with the preservation of undergrowth: 1 — felling-skidding-processing machine; 2 — standing tree; 3 — fallen tree; 4 — trail boundary; 5 — stump [14]

Но благодаря тому, что ВТПМ оснащена харвестерной головкой, а не захватно-срезающим устройством (ЗСУ) как ВТМ, технологическая вариативность её работы существенно расширяется по сравнению с ВТМ не только на верхнем складе. Например,

при работе на слабонесущих почвогрунтах в тёплый период года ВТПМ может после валки деревьев выполнять обрезку сучьев с укладкой кроновой части на ездовую поверхность трелёвочного волока для его укрепления, т. е. машина будет работать в режиме валка — обрезка сучьев — трелёвка — раскряжёвка.

Получаемые при таком варианте работы хлысты ВТПМ может так же, как в варианте предварительной разрубки пасечного волока (рисунок 4), предварительно укладывать на краю его трассы, при её движении от уса лесовозной дороги. Только укладывать хлысты не комлями в сторону лесовозного уса, как на рисунке 4, а вершинами к нему. Технически машина вполне может это выполнять.

В таком случае при движении по укрепленному пасечному волоку в грузовом направлении — к лесовозному усу машина может собирать подготовленные хлысты в кониковый зажим вершинами вперёд, что позволит существенно увеличить объём трелюемой пачки по сравнению с вариантом трелёвки деревьев за комли, при прочих равных условиях.

Это, в определённых условиях, может повысить производительность ВТПМ и снизить её негативное воздействие на почвогрунты лесосек, благодаря укреплению ездовой поверхности волока. Кроме того, как известно, вмятые в почвогрунт и передавленные движителями лесных машин порубочные остатки (кроновая часть деревьев) быстрее перегнивают и удобряют почвогрунты, что повышает эффективность лесовосстановления. То есть в определённых условиях предложенный вариант работы ВТПМ может повысить и эксплуатационную, и экологическую эффективность её работы одновременно.

ВТПМ является универсальной лесозаготовительной машиной — одномашинным лесозаготовительным комплексом, который сам по себе не предназначен для масштабных рубок, и он не может конкурировать по производительности с двухмашинным лесозаготовительным комплексом, работающим по скандинавской технологии, и тем более, с трёхмашинным комплексом, работающим по канадской технологии [20], [21].

В современных условиях одномашинные лесозаготовительные комплексы являются очень удачным решением для мелких лесозаготовительных предприятий, в т. ч. ввиду большого дефицита вальщиков леса. Но в случае увеличения объёмов заготовки древесины ВТПМ отнюдь не будет бесполезной. Она может работать в режиме обычного харвестера, являясь частью двухмашинного лесозаготовительного комплекса, а также в режиме двухстадийной трелёвки, с подтрелёвкой деревьев на промежуточную площадку, производством из них сортиментов, которые затем до погрузочного пункта будет трелевать форвардер. При этом кроновую часть в диссертационной работе П. В. Будника предлагается перерабатывать в топливную щепу (рисунок 5).

Конечно, производство топливной щепы из кроновой части деревьев, подтрелёванных за комли в полупогруженном положении в летний период, будет приводить к быстрому затуплению ножей самоходной рубительной машины, а сама щепа будет включать повышенное количество минеральных включений. Кроме этого, промежуточная площадка

должна вписаться в ограничение площади под погрузочными пунктами, производственными и бытовыми объектами, указанное в приказе Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 23 от 17.01.2022 г. «Об утверждении видов лесосечных работ, порядка и последовательности их выполнения, формы технологической карты лесосечных работ, формы акта заключительного осмотра лесосеки и порядка заключительного осмотра лесосеки», что на небольших по площади лесосеках может оказаться проблемой.

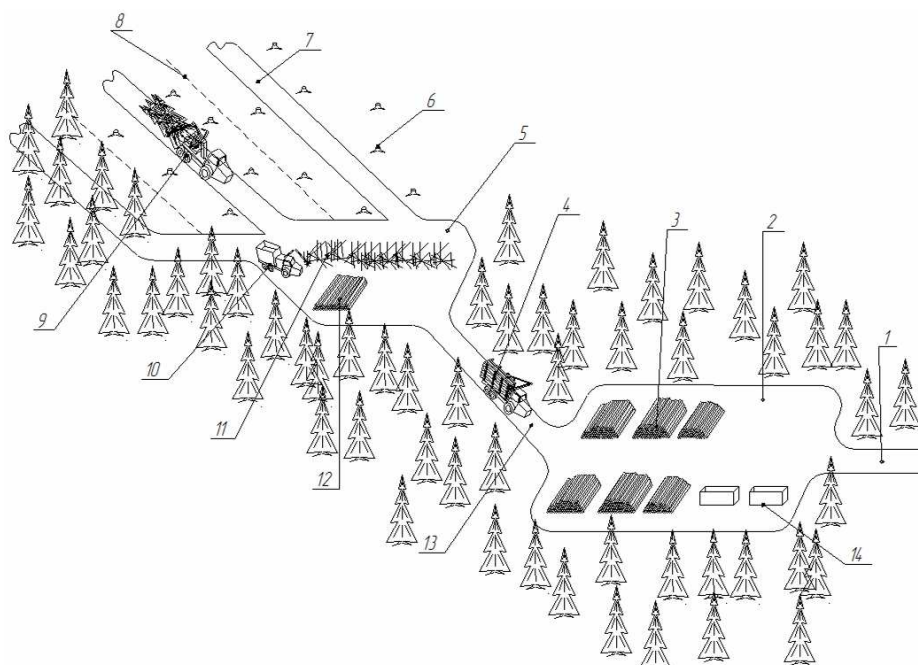


Рисунок 5. Схема разработки лесосеки системой машин ВТПМ + форвардер: 1 — лесовозный ус; 2 — погрузочный пункт; 3 — штабели сортиментов; 4 — форвардер; 5 — промежуточная площадка; 6 — пень; 7 — пасечный трелёвочный волок; 8 — граница пасеки; 9 — ВТПМ; 10 — самоходная рубительно-трелёвочная машина; 11 — порубочные остатки; 12 — пакеты сортиментов; 13 — магистральный трелёвочный волок; 14 — контейнер для топливной щепы [14]

Figure 5. The scheme of the development of the cutting area using the felling-skidding-processing machine + forwarder machine system: 1 — logging spur; 2 — loading point; 3 — stacks of sorts; 4 — forwarder; 5 — intermediate platform; 6 — stump; 7 — skidding trail; 8 — cutting strip border; 9 — felling-skidding-processing machine; 10 — self-propelled chopping and skidding machine; 11 — felling residues; 12 — sorting packages; 13 — main skidding trail; 14 — container for fuel chips [14]

При необходимости (и возможности) значительного увеличения объёма заготовки древесины ВТПМ может органично вписаться и в трёхмашинный канадский комплекс, заменяя валочно-пакетирующую машину (ВПМ) и облегчая работу пачкоподборщика (скиддера) (рисунки 6—8).

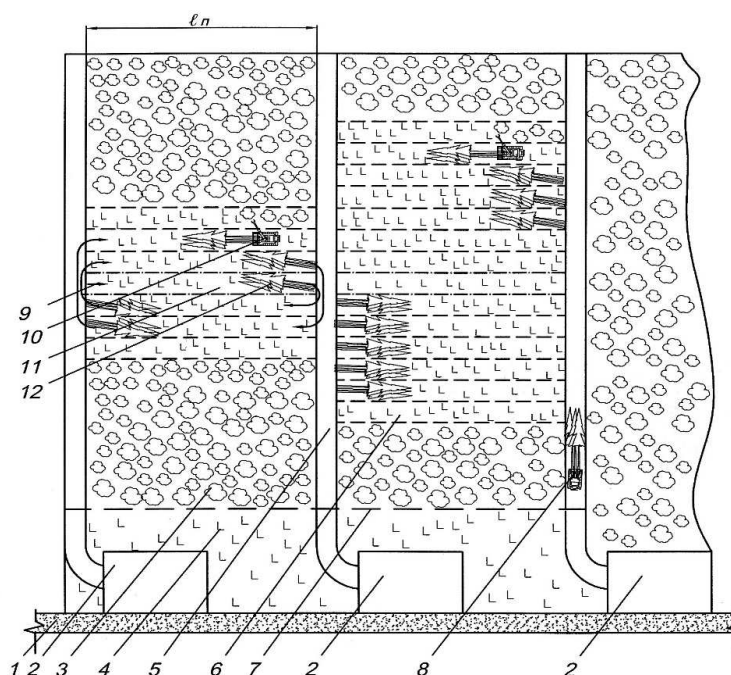


Рисунок 6. Схема разработки лесосек ВТПМ в режиме валка — пакетирование: 1 — лесовозный ус; 2 — верхний склад; 3 — растущий лес; 4 — пни; 5 — магистральный трелёвочный волок; 6 — ленты; 7 — граница зоны безопасности; 8 — скиддер; 9 — рейсы ВТПМ; 10 — ВТПМ; 11 — технологический коридор для заезда ВТПМ; 12 — пачки деревьев [22]

Figure 6. Scheme of development of felling-skidding-processing machine logging sites in the felling mode-bundling: 1 — logging spur; 2 — upper warehouse; 3 — growing forest; 4 — stumps; 5 — trunk skidding trail; 6 — bands; 7 — border of the safety zone; 8 — skidder; 9 — felling-skidding-processing machine passages; 10 — felling-skidding-processing machine; 11 — technological corridor for the arrival of felling-skidding-processing machine; 12 — bundles of trees [22]

Идея схемы разработки лесосеки, представленная рисунке 6, аналогична принципу работы ВТМ в режиме валка — пакетирование с двухстадийной трелёвкой. Двигаясь челночными ходами, ВТПМ валит и собирает в кониковый зажим комли деревьев, после чего подтрелёвывает их к магистральному трелёвочному волоку. Сбрасывает собранную пачку, после чего её подбирает скиддер и трелюет на верхний склад. Представленная на рисунке 8 схема соответствует расположению волоков с широким фронтом отгрузки. Но она вполне может быть упрощена до одного магистрального волока, по центру лесосеки, и одного верхнего склада. По бокам лесосеки можно прокладывать только холостые (заездные) волока, по которым ВТПМ будет заезжать на ленты, для набора пачки. В принципе для работы ВТПМ, как и ВТМ, хорошо подойдут перпендикулярные схемы расположения трелёвочных волоков [23].

На V Лесопромышленном форуме Республики Саха (Якутия) «Современные технологии: Качество. Конкурентоспособность. Эффективность», который проводился 31 мая 2023 г. в Арктическом государственном агротехнологическом университете, Эдуард Романов, генеральный директор ООО «КОНРАД РУССЛАНД», в докладе «Мономеханизм на лесочистке и лесозаготовке» рассказал о преимуществах использования на лесосечных работах современных ВТПМ и представил различные варианты их технологического использования. В частности, помимо классического варианта одномашинного лесозаготовительного комплекса был рассмотрен вариант использования одной или двух ВТПМ в качестве ВТМ и процессора на верхнем складе (рисунки 7 и 8).

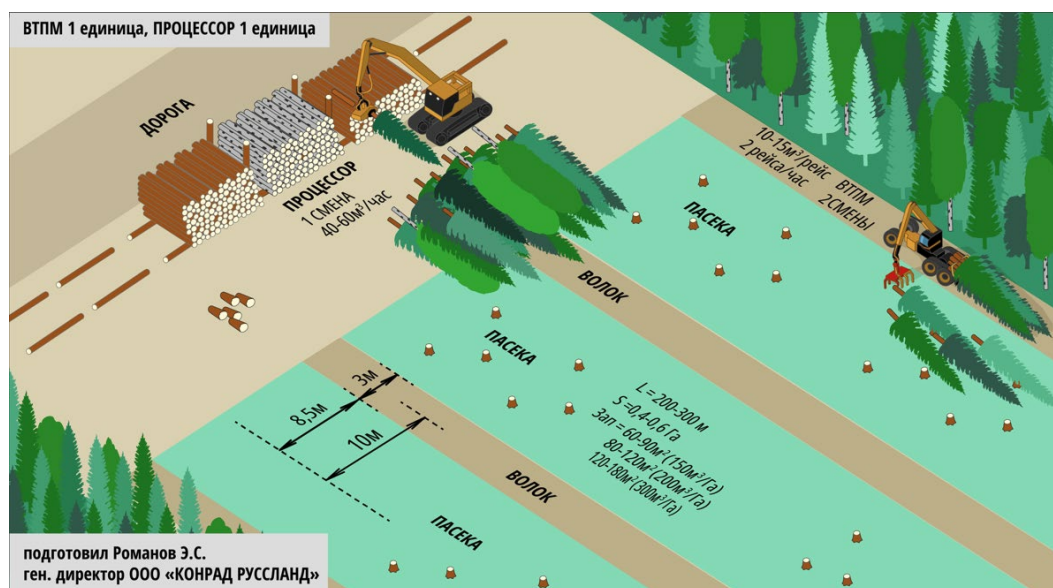


Рисунок 7. Фрагмент презентации Эдуарда Романова: система машин 1 процессор + 1 ВТПМ

Figure 7. Fragment of Eduard Romanov's presentation: machine system 1 processor + 1 felling-skidding-processing machine

Однако при использовании одной ВТПМ в качестве ВТМ она не сможет полностью загрузить работой процессор, который придётся в этом случае использовать как функциональное звено, может быть, в паре с погрузчиком. При использовании двух ВТПМ в качестве ВТМ они уже будут в состоянии полностью загрузить процессор, и если доукомплектовать такую бригаду погрузчиком, то можно передать ей функции укрупнённой лесозаготовительной бригады.

Вместе с тем широкое использование ВТПМ в качестве ВТМ представляется нерациональным и не может быть рекомендовано для широкого использования, поскольку ЗСУ классической ВТМ значительно легче и дешевле, нежели харвестерная головка. Следовательно, при прочих равных условиях, полезная грузоподъёмность у ВТМ больше,

а удельный расход топлива на кубометр заготовленной и стрелёванной древесины меньше, чем у ВТПМ. Поэтому в случае необходимости значительного увеличения объёма заготовки древесины в единицу времени и перехода с одномашинного лесозаготовительного комплекса на многомашинный значительно более рациональным будет использовать ВТПМ в качестве классического харвестера, т. е. использование скандинавского варианта технологии лесосечных работ, с добавлением в систему одного или двух форвардеров. То же можно сказать и про форвестер. Или, в случае предпочтения канадскому варианту технологии лесосечных работ, ВТПМ следует переоснастить классической ЗСУ вместо харвестерной головки.

В обратной ситуации, когда объём лесосечного фонда небольшой и его увеличение не ожидается, технологическое оборудование ВТПМ с вальцовой харвестерной головки (непрерывного действия) можно заменить на импульсную харвестерную головку (периодического действия). Импульсная харвестерная головка, безусловно, менее производительна, но значительно дешевле, проще в эксплуатации (не требует высокой квалификации оператора, не нуждается в периодической поверке и калибровке) и легче [24—26].

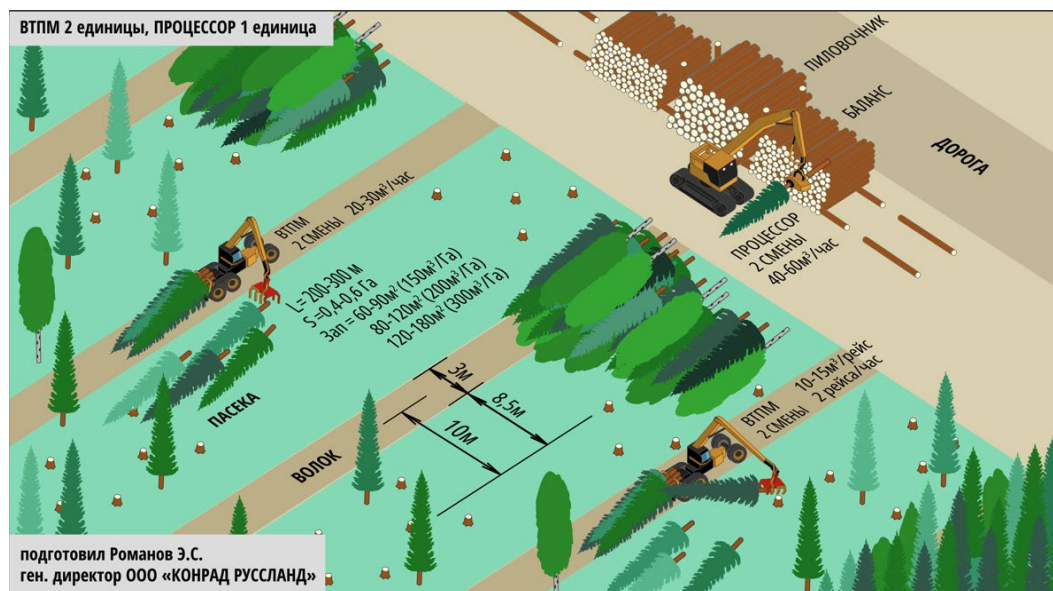


Рисунок 8. Фрагмент презентации Эдуарда Романова: система машин 1 процессор + 2 ВТПМ

Figure 8. Fragment of Eduard Romanov's presentation: machine system 1 processor + 2 felling-skidding-processing machine

Отметим, что ВТПМ компании Konrad Forsttechnik имеет конструктивные возможности трансформации в харвардер — путём замены коникового зажимного устройства на кониковую тележку для сортиментов (фото 3).

ВТПМ компании Konrad Forsttechnik оснащается харвестерной головкой Woody 61, которая может использоваться для валки деревьев, обрезки сучьев и раскряжёвки, работы в режиме процессора или как грейферный захват для погрузки сортиментов со свободным вращением на 360°. Диапазон диаметров обрабатываемых деревьев 4—65 см, а при валке — диаметром до 70 см. Блок протяжки-раскряжёвки может складываться во время использования агрегата в режиме захвата. В агрегат встроен ротатор свободного вращения. Достаточно высокая, хорошо сбалансированная конструкция головки позволяет оператору легче контролировать наведение агрегата на ствол и направление валки деревьев, особенно крупных. Усилие протяжки ствола при обрезке сучьев в 35 кН передаётся через четыре вальца с диапазоном скоростей 0—4 м/с.



Фото 3. Харвардер на базе ВТПМ компании Konrad Forsttechnik (фото авторов)

Photo 3. Harvardder based on the felling-skidding-processing machine of Konrad Forsttechnik

С точки зрения экологической эффективности ВТПМ, по аналогии с обычным трелёвочным трактором, в первую очередь следует оценивать степень его воздействия на лесные почвогрунты в тёплый период года. Для ВТПМ HIGHLANDER HL10-2 с колёсной формулой 4к4, оснащённой шинами 700/55-34, статическое давление на почвогрунт можно проиллюстрировать рисунком 9 [27].

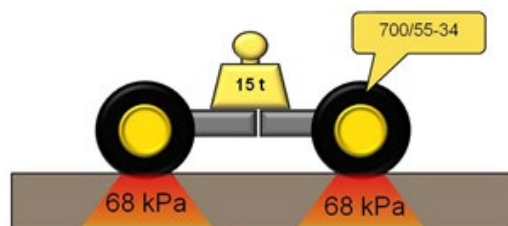


Рисунок 9. Статическое давление на почвогрунт ВТПМ HIGHLANDER HL10-2 [27]

Figure 9. Static pressure on the soil of the felling-skidding-processing machine HIGHLANDER HL10-2 [27]

Для ВТПМ HIGHLANDER HL20-2 с колёсной формулой 6к6, оснащённой шинами 700/55-34 на переднем мосту и 710/45-26,5 на задней tandemной тележке, в вариантах с оснащением tandemных колёс моногусеницами и без них статическое давление на почвогрунт можно проиллюстрировать рисунком 10 [27].

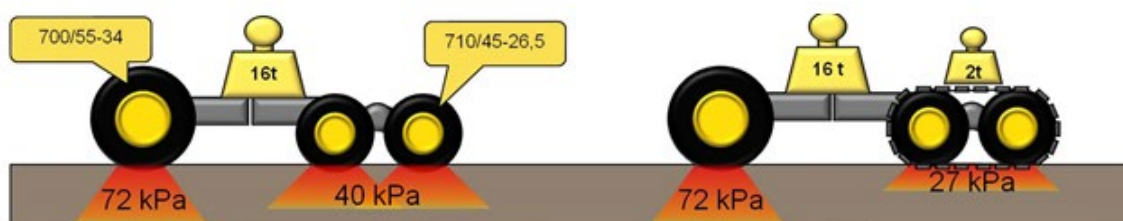


Рисунок 10. Статическое давление на почвогрунт ВТПМ HIGHLANDER HL20-2 [27]

Figure 10. Static pressure on the soil of the felling-skidding-processing machine HIGHLANDER HL20-2 [27]

Как видно из рисунка 10, давление tandemной тележки на почвогрунт, при незагруженном древесиной кониковом зажиме, достаточно низкое. Но если учитывать, что на комлевую часть пачки деревьев, загружаемую в кониковый зажим ВТПМ, приходится около 70 % веса всей пачки, то давление на почвогрунт трелёвочной системы на базе ВТПМ, особенно без оснащения tandemных колёс моногусеницами, может существенно возрасти. При заявляемом компанией Konrad Forsttechnik объёме пачки для ВТПМ 8 м³ и плотности свежесрубленной древесины (например, 0,8 т/м³) вертикальная нагрузка на коник ВТПМ составит около 4,5 т, или 44 кН.

Причём следует учитывать, что при достаточно большой скорости ВТПМ её движитель, помимо статического давления, также будет оказывать дополнительное динамическое воздействие на почвогрунт. Как показано в работе [28], «динамическая составляющая суммарного уплотнения почвогрунта волока весома. На волокнах с относительно небольшими

микронеровностями она находится в диапазоне 23—50 %, а на волоках с большими микронеровностями достигает 60 % и более».

Волочащаяся по почвогрунту кроновая часть пачки деревьев будет оказывать небольшой разрыхляющий эффект, снижая результат уплотняющего воздействия ВТПМ. Правда, при этом силы сопротивления движению трелёвочной системы увеличиваются, что, соответственно, приводит к увеличению расхода топлива [29]. Это, в свою очередь, приводит к некоторому снижению эксплуатационной эффективности ВТПМ.

С другой стороны, при трелёвке хлыстов за вершины вертикальная нагрузка на коник ВТПМ будет небольшой, зев коника даже позволит набрать пачку объёмом более 8 м³, но тяжёлая комлевая часть пачки, волочащаяся по почвогрунту, будет оказывать негативное уплотняющее воздействие на почвогрунт, сравнимое, а иногда и превышающее уплотняющее воздействие ВТПМ.

Помимо удельного расхода топлива (л/м³) эксплуатационную эффективность ВТПМ, как и других лесных машин, следует оценивать по производительности. Надо отметить, что до настоящего времени в литературе не представлены зависимости для теоретической оценки часовой производительности ВТПМ. Но их можно вывести из известных зависимостей для определения производительности широкозахватной ВТМ и процессора.

В классическом варианте использования ВТПМ цикл её работы можно представить суммой затрат времени на выполнение следующих операций: холостой ход (от верхнего склада до начала ленты набора пачки); набор пачки (валка деревьев на технологических стоянках, укладка их в кониковый зажим, перемещение между технологическими стоянками); грузовой ход (движение трелёвочной системы до верхнего склада); поштучная выгрузка и обработка деревьев (обрезка сучьев и раскряжёвка) с укладкой полученных сортиментов в штабели.

Длину ленты набора пачки ВТПМ, по аналогии с ВТМ, можно определить по формуле

$$l_n = 10^4 \frac{V_n}{qb_l}, \quad (1)$$

где V_n — объём формируемой пачки, м³; q — запас леса на 1 га, м³; b_l — ширина ленты, разрабатываемая ВТМ за один проход, м. У полноповоротных ВТПМ HIGHLANDER HL10-2 и HIGHLANDER HL20-2 вылет гидроманипулятора составляет 10,5 м, следовательно, ширина ленты b_l 21 м.

Объём пачки деревьев, которую можно погрузить в кониковый зажим ВТПМ, определяется по формуле

$$V_n = \frac{S_k k_n \cdot 4V_x}{\pi d_k^2}, \quad (2)$$

где S_k — площадь поперечного сечения коникового зажима, м²; V_x — средний объём хлыста, м³; d_k — средний диаметр дерева в комлевом отрезе, м; k_n — коэффициент полнодревесности трелюемой пачки деревьев (обычно рекомендуется принимать 0,6).

Часовую производительность ВТПМ в цикле валка — трелёвка можно выразить следующим образом:

$$\Pi_{\text{ч}} = \frac{3600 V_n f_1}{T_{\text{ц}}}, \quad (3)$$

где f_1 — коэффициент использования расчётного объёма пачки (0,8—0,9); $T_{\text{ц}}$ — время цикла набора пачки и её трелёвки, с.

$$T_{\text{ц}} = t_1 + t_2 + t_3, \quad (4)$$

где t_1 — время холостого хода ВТПМ, с; t_2 — время набора пачки, с; t_3 — время грузового хода ВТПМ, с.

Время движения ВТПМ в грузовом и холостом направлении можно определить как:

$$t_1 + t_3 = \frac{2l_{\text{ср}}}{V_{\text{ср}}}, \quad (5)$$

где $l_{\text{ср}}$ — среднее расстояние трелёвки, м; v — средняя скорость движения ВТПМ, м/с. Средняя скорость движения ВТПМ определяется по формуле

$$v_{\text{ср}} = \frac{v_z + v_x}{2}, \quad (6)$$

где v_z и v_x — соответственно скорости движения ВТПМ в грузовом и холостом направлении, м/с.

Безусловно, составляющие $T_{\text{ц}}$ будут во многом зависеть от квалификации оператора, особенно составляющая t_2 . Её составляющие можно представить выражением

$$t_2 = (t_{\text{нг}} + t_{\text{сн}} + t_{\text{ук}}) n_{\text{д}} + t_{\text{тс}}, \quad (7)$$

где $t_{\text{нг}}$ — время наводки гидроманипулятором харвестерной головки на дерево (обычно 20—40 с); $t_{\text{сн}}$ — время спиливания одного дерева, с; $t_{\text{ук}}$ — время укладки одного дерева в кониковый зажим (обычно 20—40 с); $n_{\text{д}}$ — число деревьев в пачке, шт.; $t_{\text{тс}}$ — время перемещения между технологическими стоянками при наборе одной пачки, с.

Число деревьев в одной пачке несложно определить по выражению

$$n_{\text{д}} = \frac{V_n f_1}{V_x}, \quad (8)$$

где V_x — средний объём хлыста, м³.

Время спиливания одного дерева можно определить по формуле

$$t_{\text{сн}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{к}}^2}{4 \cdot \Pi_{\text{с.п.}} \cdot \Phi_{\text{с.п.}}}, \quad (9)$$

где $P_{ч.п.}$ — производительность чистого пиления пильной гарнитуры ВТПМ, $\text{м}^2/\text{с}$; $\varphi_{ч.п.}$ — коэффициент использования производительности чистого пиления.

Время перемещения между технологическими стоянками при наборе одной пачки можно определить исходя из следующих зависимостей:

$$t_{\text{тс}} = t_{\text{тс.см}} n_{\text{тс}}, \quad (10)$$

где $t_{\text{тс.см}}$ — время перемещения ВТПМ между двумя смежными технологическими стоянками при наборе пачки, с; $n_{\text{тс}}$ — количество технологических стоянок ВТПМ при наборе одной пачки, шт.

$$t_{\text{тс.см}} = \frac{(R-r)}{v_r}, \quad (11)$$

где R — максимальный вылет гидроманипулятора ВТПМ, м; r — минимальный вылет гидроманипулятора ВТПМ, м.

$$n_{\text{тс}} = \frac{n_d}{n_{\text{д.тс}}}, \quad (12)$$

где $n_{\text{д.тс}}$ — количество деревьев, собираемых ВТПМ с одной технологической стоянки, шт.

$$n_{\text{д.тс}} = \frac{Q_{\text{л}}}{V_r}, \quad (13)$$

где $Q_{\text{л}}$ — запас древесины на площади, обрабатываемой ВТПМ с одной технологической стоянки, м^3 .

$$Q_{\text{л}} = S_{\text{л}} \cdot q, \quad (14)$$

где $S_{\text{л}}$ — площадь, обрабатываемая ВТПМ с одной технологической стоянки, м^2 .

С достаточной для практических расчётов точностью $S_{\text{л}}$ можно определить по выражению

$$S_{\text{л}} = (R-r)b_{\text{л}}. \quad (15)$$

Время обработки стрелёванной ВТПМ пачки на верхнем складе можно определить из выражения

$$T_{\text{п.обп}} = (t_{\text{нг}} + t_{\text{нр}} + t_{\text{р}} + t_{\text{ук}})n_{\text{п}}, \quad (16)$$

где $t_{\text{нг}}$ — время наводки харвестерной головки на дерево и его захвата (обычно 10—20 с), с; $t_{\text{нр}}$ — время протяжки ствола через харвестерную головку, с; $t_{\text{р}}$ — время на раскряжёвку одного ствола, с; $t_{\text{ук}}$ — время укладки получаемых сортиментов в штабель, с.

$$t_{\text{нр}} = \frac{l_x}{v_n}, \quad (17)$$

где l_x — длина ствола среднего дерева, м; v_n — скорость протяжки ствола через сучкорезную головку, с.

$$t_{\text{р}} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot n_{\text{р}}}{4P_{\text{ч.п.}} \cdot \varphi_{\text{ч.п.}}}, \quad (18)$$

где d — средний комлевой диаметр выпиливаемых сортиментов, м; n_p — среднее число резов, выполняемых при раскряжёвке одного ствола, шт.

$$n_p = \frac{l_x}{l_c}, \quad (19)$$

где l_c — средняя длина выпиливаемых сортиментов, м.

В связи с тем, что укладка выпиливаемых ВТПМ сортиментов в штабель производится одновременно с протяжкой, t_{yk} можно отдельно не учитывать и принимать равным нулю.

Тогда часовую производительность ВТПМ в полном цикле работы можно определить по формуле

$$П_{\text{ч}} = \frac{3600 V_n f_1}{T_H + T_{\text{ц.обр}}}. \quad (20)$$

Или, принимая во внимание выражения (4)—(20), можно получить следующую зависимость:

$$П_{\text{ч}} = \frac{3600 \frac{S_R k_n 4 V_x}{\pi d_R^2} f_1}{\frac{\pi l_{\text{ср}}}{\frac{v_r + v_x}{2}} + \left(t_{\text{нр}} + \frac{\pi d_R^2}{4 \Pi_{\text{ч.л.}} \varphi_{\text{ч.л.}}} + t_{\text{ук}} \right) \frac{S_R k_n 4 V_y f_1}{V_x} + \frac{(R-r) \frac{S_R k_n 4 V_x f_1}{\pi d_R^2}}{v_r \frac{(R-r) b_{\text{пг}}}{V_x}} + \left(t_{\text{нр}} + \frac{l_x}{v_n} + \frac{\pi d^2 n_p}{4 \Pi_{\text{ч.л.}} \varphi_{\text{ч.л.}}} \right) \frac{S_R k_n 4 V_x f_1}{\pi d_R^2}}. \quad (21)$$

В случае работы ВТПМ в рассмотренном выше режиме валка — обрезка сучьев — трелёвка — раскряжёвка в выражении (2) и, соответственно, в формуле (21) изменится составляющая d_k — средний диаметр дерева в комлевом отрезе на d_b — средний диаметр хлыста в вершинном отрезе. Согласно ГОСТ, d_b должен составлять 6—8 см, но следует учитывать тот факт, что на практике многих лесозаготовительных предприятий Сибири и Дальнего Востока он часто составляет 14—16 см из-за отсутствия экономически доступных потребителей балансовой древесины.

При определении затрат времени на сбор хлыстов в кониковый зажим, по аналогии с бесчокерными трелёвочными тракторами, можно ориентироваться на следующие данные хронометражных наблюдений (таблица).

Таблица. Приёмы технологического цикла бесчокерных трелёвочных тракторов [18]

Table. Techniques of the technological cycle of chokerless skidding tractors [18]

Наименование приёма	Продолжительность, с
Наводка захвата	6
Захват ствола	3
Укладка в коник	6—20
Закрытие коника	4
Переезд на следующую стоянку	10

В случае работы ВТПМ в режиме ВТМ (рисунки 9 и 10) в выражение (4) добавится слагаемое t_4 — время разгрузки пачки на верхнем складе, которое можно определить по эмпирическому выражению:

$$t_4 = (0,24V_n + 1,33)60, \quad (22)$$

При этом из выражения (20) второе слагаемое знаменателя $T_{ц.обр}$ будет исключено, а выражение (21), с учётом формул (2) и (22), примет следующий вид:

$$\Pi_{\text{ч}} = \frac{3600 \frac{S_{\text{ккн}} 4 V_{\text{х}} f_1}{\pi d_{\text{к}}^2}}{\frac{2l_{\text{ср}}}{v_{\text{т}} + v_{\text{х}}} + \left(t_{\text{нт}} + \frac{\pi d_{\text{к}}^2}{4 \Pi_{\text{ч.л.}} \varphi_{\text{ч.л.}}} + t_{\text{ук}} \right) \frac{S_{\text{ккн}} 4 V_{\text{х}} f_1}{\pi d_{\text{к}}^2 V_{\text{х}}} + \frac{(R-r)}{v_{\text{т}}} \frac{\pi d_{\text{к}}^2}{(R-r) b_{\text{лг}}} \frac{S_{\text{ккн}} 4 V_{\text{х}} f_1}{V_{\text{х}}} + (0,24 \frac{S_{\text{ккн}} 4 V_{\text{х}} f_1}{\pi d_{\text{к}}^2} + 1,33) 60}. \quad (23)$$

Несмотря на подавляющее доминирование в Российской Федерации сортиментных технологических процессов лесосечных работ, ряд крупных лесопромышленных холдингов Сибири сохраняют и даже увеличивают объём хлыстовой заготовки древесины, что связано с увеличением плотового лесосплава по сибирским рекам и позволяет выполнять раскряжёвку более качественно на стационарных раскряжёвочных линиях, оснащённых рентген-аппаратами и специальным программным обеспечением для оптимизации раскряжки хлыстов [30].

ВТПМ и в данном случае будет показывать хорошие результаты в качестве валочно-трелёвочно-сучкорезной машины или валочно-сучкорезно-трелёвочной машины, в зависимости от природно-производственных условий, прежде всего почвенно-грунтовых.

Часовая производительность ВТПМ в этом случае может быть определена по выражению

$$\Pi_{\text{ч}} = \frac{3600 \frac{S_{\text{ккн}} 4 V_{\text{х}} f_1}{\pi d_{\text{к}}^2}}{\frac{2l_{\text{ср}}}{v_{\text{т}} + v_{\text{х}}} + \left(t_{\text{нт}} + \frac{\pi d_{\text{к}}^2}{4 \Pi_{\text{ч.л.}} \varphi_{\text{ч.л.}}} + t_{\text{ук}} \right) \frac{S_{\text{ккн}} 4 V_{\text{х}} f_1}{\pi d_{\text{к}}^2 V_{\text{х}}} + \frac{(R-r)}{v_{\text{т}}} \frac{\pi d_{\text{к}}^2}{(R-r) b_{\text{лг}}} \frac{S_{\text{ккн}} 4 V_{\text{х}} f_1}{V_{\text{х}}} + \left(t_{\text{нт}} + \frac{l_{\text{х}}}{v_{\text{н}}} \right) \frac{S_{\text{ккн}} 4 V_{\text{х}} f_1}{\pi d_{\text{к}}^2}}, \quad (24)$$

Как было отмечено выше, изначально ВТПМ HIGHLANDER предназначена для работы на склонах. В этой связи при определении возможного веса собираемой и трелюемой пачки лесоматериалов при работе ВТПМ на склоне целесообразно проверять по мощности двигателя по известному выражению:

$$Q = \frac{F_k - P(\varphi_{\text{т}} \cos \alpha \pm \sin \alpha)}{k(\varphi_{\text{т}} \cos \alpha \pm \sin \alpha) + (1 - k)(\varphi_{\text{н}} \cos \alpha \pm \sin \alpha)}, \quad (25)$$

где F_k — касательная сила тяги ВТПМ, Н; P — эксплуатационный вес ВТПМ, Н; k — коэффициент распределения веса трелюемой пачки между трактором и волоком; Q — вес трелюемой пачки, Н; α — угол уклона пути движения ВТПМ с пачкой, град.; $\varphi_{\text{т}}$ — коэффициент сопротивления движению ВТПМ; $\varphi_{\text{н}}$ — коэффициент сопротивления движению волокающейся части трелюемой пачки.

Коэффициенты сопротивления рекомендуется принимать: зимой $\varphi_m = 0,09—0,18$, летом $\varphi_m = 0,14—0,25$; пачки при трелёвке хлыстами: зимой $\varphi_n = 0,50$, летом $\varphi_n = 0,70$; при трелёвке деревьями зимой и летом $\varphi_n = 0,90$ [18], [19], [22], [23], [31—33].

Соответственно, касательная сила тяги ВТПМ может быть определена по известному выражению

$$F_k = \frac{N\eta_{TP}}{v_z}, \quad (26)$$

где N — мощность двигателя ВТПМ, Вт, η_{TP} — КПД трансмиссии ВТПМ.

С учётом формулы (26) выражение (25) можно записать в виде:

$$Q = \frac{\frac{N\eta_{TP}}{v_z} - P(\phi_m \cos \alpha \pm \sin \alpha)}{k(\phi_m \cos \alpha \pm \sin \alpha) + (1-k)(\phi_n \cos \alpha \pm \sin \alpha)}, \quad (27)$$

Сменная производительность ВТПМ (при любом варианте технологического использования, при известной часовой производительности) будет определяться по выражению

$$P_{см} = P_q \cdot t \cdot \phi_2, \quad (28)$$

где t — число часов в смене; ϕ_2 — коэффициент использования рабочего времени.

Из выражения (27) видно, что скорость движения трелёвочной системы на базе ВТПМ двояко влияет на производительность. С одной стороны, уменьшение скорости движения ВТПМ в грузовом режиме, при прочих равных условиях, позволяет увеличить возможный объём трелюемой пачки, с другой стороны, это приведёт к увеличению времени цикла времени набора и трелёвки одной пачки.

Как было отмечено выше, большие скорости движения трелёвочной системы приводят к возникновению динамической составляющей уплотняющего воздействия движителя на почвогрунт. Но следует отметить, что увеличение объёма пачки, особенно с учётом того, что 70 % её веса приходится на коник ВТПМ, также может привести к переуплотнению почвогрунта, что особенно нежелательно в условиях лесов на вечной мерзлоте [34—41].

В связи с этим, исходя из задачи повышения как эксплуатационной, так и экологической эффективности работы ВТПМ, желательно выполнять планирование разработки лесосеки с учётом её рельефных и почвенно-грунтовых условий, а также особенностей размещения запаса эксплуатационных насаждений, наличия, площади и размеров неэксплуатационных площадей [42—56].

4. Выводы

Таким образом, проанализированы четыре варианта технологического использования ВТПМ в режиме: валка — трелёвка — обрезка сучьев — раскряжёвка; валка — обрезка сучьев — трелёвка — раскряжёвка; трелёвка; трелёвка — обрезка сучьев. Предложены

аналитические зависимости для определения производительности ВТПМ во всех рассмотренных случаях.

Работа выполнена в рамках деятельности научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Исследование осуществлено на средства гранта Российского научного фонда № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Список литературы

1. Григорьев И. «Амкодор». Реальные перспективы отечественного лесного машиностроения // ЛесПромИнформ. 2022. № 4 (166). С. 16—21.
2. Григорьев И., Григорьева О. «Амкодор-Онего» — ещё один год поступательного развития в сложных условиях // ЛесПромИнформ. 2023. № 4 (174). С. 38—40.
3. New approach for forest production stocktaking based on energy cost / I. Grigorev, V. Ivanov, E. Khitrov [et al.] // 14th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2014. Sofia, Bulgaria, 2014. P. 407—414.
4. Пути повышения эффективности работы лесных машин / И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, С. Е. Рудов [и др.] // Энергия: экономика, техника, экология. 2020. № 1. С. 55—63.
5. Григорьев И. В., Григорьева О. И., Чураков А. А. Эффективные технологии и системы машин для малообъёмных заготовок древесины // Энергия: экономика, техника, экология. 2018. № 2. С. 61—66.
6. Методика определения топливной экономичности бензомоторных пил / И. К. Александров, И. В. Григорьев, В. А. Иванов [и др.] // Вестник КрасГАУ. 2010. № 2 (41). С. 112—117.
7. Григорьев И. В. Параметры и показатели работы перспективного форвардера для малообъёмных лесозаготовок // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2018. Т. 6, № 4 (40). С. 21—25.
8. Григорьев И. В., Чураков А. А. Совершенствование конструкции активного полуприцепа форвардера на базе сельскохозяйственного колёсного трактора // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Н. С. Захаров. Тюмень, 2018. С. 84—88.
9. Перспективные направления развития технологических процессов лесосечных работ / И. В. Григорьев, О. И. Григорьева, А. И. Никифорова [и др.] // Труды БГТУ. № 2: Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2016. № 2 (184). С. 109—116.
10. Григорьев И. В., Григорьева О. И., Куницкая О. А. Переработка древесины на лесосеке: перспективы развития // Энергия: экономика, техника, экология. 2017. № 2. С. 27—33.
11. Григорьев И. В., Войнаш С. А. Повышение эффективности подготовки операторов лесных машин // Лесозаготовка и комплексное использование древесины: Сб. ст. Всерос. научно-практич. конф. Красноярск, 2020. С. 62—66.
12. Современные системы машин и технологии заготовки древесины и лесовосстановления в условиях горных лесосек / В. А. Каляшов, А. До Туан, Е. Г. Хитров [и др.] // Resources and Technology. 2022. Т. 19, № 2. С. 1—47.
13. Григорьев И. В. Современные проблемы импортозамещения в лесном машиностроении Российской Федерации // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции

- и перспективы развития: Материалы Всерос. научно-практич. конф. / Отв. ред.: Ю. А. Безруких, Е. В. Мельникова. Красноярск, 2022. С. 165—169.
14. Будник П. В. Обоснование технологических решений, повышающих эффективность заготовки сортиментов и лесосечных отходов, на основе функционально-технологического анализа: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Петрозаводск: ПетрГУ, 2011. 22 с.
 15. Будник П. В., Скрыпник В. И. Обоснование масс и объёмов пачек деревьев, трелюемых валочно-трелёвочно-процессорной машиной с учётом природно-производственных условий и районов лесозаготовок // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2010. № 27. С. 3—6.
 16. Шегельман И. Р., Будник П. В. Обоснование вылета манипулятора и режимов работы валочно-трелёвочно-процессорной машины // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2011. № 4 (117). С. 81—83.
 17. Будник П. В. Обоснование максимального вылета манипулятора валочно-трелёвочно-процессорной машины для различных природно-производственных условий // Севергеозкотех-2011: Материалы XII междунар. молодёжной науч. конф.: В 5 ч. Ухта, 2011. С. 16—21.
 18. Технология и машины лесосечных работ: Учебник для вузов / В. И. Пятакин, И. В. Григорьев, А. К. Редькин [и др.]. СПб.: ГПУ, 2012. 362 с.
 19. Цыгарова М. В., Григорьев И. В. Машины для лесосечных работ. Ч. 1: Технологическое оборудование и приёмы работы трелёвочных тракторов: Учебное пособие. Ухта: УГТУ, 2011. 128 с.
 20. Григорьев И. В., Никифорова А. И., Григорьева О. И. Сравнение одномашинных комплексов для сортиментной заготовки древесины // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. Воронеж, 2015. Т. 3, № 9-2 (20-2). С. 125—128.
 21. Григорьев И. В., Винокуров С. Л. Сравнение вариантов систем машин для малообъёмных лесозаготовок // Вестник АГАТУ. 2021. № 3 (3). С. 51—62.
 22. Григорьев И. В., Тихонов И. И., Куницкая О. А. Технология и машины лесосечных работ: Учебное пособие по курсовому проектированию для студентов направлений подготовки бакалавров 250400 «Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств», профиль «Лесоинженерное дело». СПб.: СПбГЛТУ, 2013. 132 с.
 23. Технология и оборудование лесопромышленных производств. Технология и машины лесосечных работ: Учебное пособие / И. В. Григорьев, А. К. Редькин, В. Д. Валяжонков [и др.]. СПб.: Изд-во ЛТА, 2010. 330 с.
 24. Григорьев И. В. Направления совершенствования харвестерных головок // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Шестой Всерос. национал. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2020. С. 45—47.
 25. Григорьев И. В. Калибровка харвестерных головок // Наука и инновации: векторы развития: Материалы Междунар. научно-практич. конф. молодых учёных: Сб. науч. ст.: В 2 кн. Барнаул, 2018. С. 78—82.
 26. Тамби А. А., Григорьев И. В. Повышение эффективности работы харвестера путём исключения потерь времени на подготовку режущего инструмента // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 4. С. 12—16.
 27. Машинная заготовка древесины по скандинавской технологии / О. А. Куницкая, Н. А. Чернуцкий, М. В. Дербин [и др.]. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2019. 192 с.

28. Григорьев И. В. Снижение отрицательного воздействия на почву колёсных трелёвочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования. СПб.: Изд-во ЛТА, 2006. 236 с.
29. Григорьев И. В. Влияние способа трелёвки на эксплуатационную эффективность трелёвочного трактора: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб.: Изд-во ЛТА, 2000. 20 с.
30. Russian timber industry: current situation and modelling of prospects for wood biomass use / S. O. Medvedev, M. A. Zyryanov, A. P. Mokhirev [et al.] // International Journal of Design and Nature and Ecodynamics. 2022. Vol. 17, no. 5. P. 745—752.
31. Theoretical approaches to logging trail network planning: increasing efficiency of forest machines and reducing their negative impact on soil and terrain / S. E. Rudov, A. M. Voronova, J. M. Chemshikova [et al.] // Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2019. Vol. 16, no. 4. P. 61—75.
32. Improvement of the forest tracked vehicles' control by using impulse control technology for the steering mechanism / R. Dobretsov, I. Grigorev, V. Ivanov [et al.] // European Chemical Bulletin. 2021. Vol. 10, no. 1. P. 21—26.
33. Predicting the passability of wheeled tractors / A. M. Khakhina, I. V. Grigorev, N. P. Dolmatov [et al.] // Mathematical Modelling of Engineering Problems. 2022. Vol. 9, no. 5. P. 1233—1242.
34. The experimental study of logging residue stock on logging sites following clear-cutting using a sorting machine system / M. Zyryanov, I. Grigorev, S. Medvedev [et al.] // International Journal of Simulation and Process Modelling. 2023.
35. Dynamic impact of wheeled skidders on forest soil in felling areas / I. Grigorev, O. Kunickaya, E. Tikhonov [et al.] // Journal of Terramechanics. 2022. Vol. 101. P. 1—9.
36. The theoretical modeling of the dynamic compaction process of forest soil / I. Grigorev, A. Burgonutdinov, V. Makuev [et al.] // Mathematical Biosciences and Engineering. 2022. Vol. 19, no. 3. P. 2935—2949.
37. Impulse control technology for improving steering control systems of the tracked vehicles / R. Dobretsov, I. Grigorev, E. Tikhonov [et al.] // International Review of Automatic Control. 2021. Vol. 14, no. 3. P. 172—178.
38. Pressure control systems for tyre preservation in forestry machinery and forest soils / O. Kunickaya, E. Hertz, I. Kruchinin [et al.] // Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2021. Vol. 18, no. 3. P. 95—102.
39. Network planning of the technological chain for timber land development / K. Rukomojnikov, A. Mokhirev, A. Burgonutdinov [et al.] // Journal of Applied Engineering Science. 2021. Vol. 19, no. 2. P. 407—414.
40. Modeling the effect of wheeled tractors and skidded timber bunches on forest soil compaction / I. Grigorev, O. Kunickaya, A. Burgonutdinov [et al.] // Journal of Applied Engineering Science. 2021. Vol. 19, no. 2. P. 439—447.
41. Specific features of accounting of state of the massive of the frozen soil grounds under cyclic loads / S. E. Rudov, I. V. Grigorev, O. A. Kunickaya [et al.] // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2019. Vol. 25, no. Suppl. 2. P. 191—205.
42. Influence of different forest management techniques on the quality of wood / O. Grigoreva, E. Runova, V. Ivanov [et al.] // Journal of Renewable Materials. 2021. Vol. 9, no. 12. P. 2175—2188.
43. Efficiency improvement of forest machinery exploitation / I. Grigorev, O. Kunickaya, A. Prosuzhih [et al.] // Diagnostyka. 2020. Vol. 21, no. 2. P. 95—109.
44. Assessment the effect of skidding techniques on the ecological efficiency of the skidding tractor / I. Grigorev, O. Kunickaya, A. Burgonutdinov [et al.] // Diagnostyka. 2020. Vol. 21, no. 3. P. 67—75.

45. The mathematical model of forestry machines impact on cryolitozone forest soils / S. Rudov, O. Kunickaya, I. Grigorev [et al.] // Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2020. Vol. 17, no. 4. P. 89—95.
46. Comparative analysis of thinning techniques in Garchinsky forestry / O. I. Grigorieva, E. M. Runova, T. N. Storodubtseva [et al.] // Mathematical Modelling of Engineering Problems. 2022. Vol. 9, no. 2. P. 762—770.
47. Rego G. E., Voronov R. V., Grigoreva O. I. Algorithms for calculating schemes of transport routes in a felling area // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2. Series «II All-Russian Scientific-Technical Conference "Digital Technologies in Forest Sector"». Saint Petersburg, 2021. P. 012025.
48. Khitrov E., Grigorev G., Dmitrieva I. Theoretical estimation of soil resistance to forestry vehicles turning // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020. Sofia, Bulgaria, 2020. P. 757—762.
49. Grigorev G., Dmitrieva I., Khitrov E. Theoretical evaluation of rut depth components caused by forest soil shear and compaction // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020. Sofia, Bulgaria, 2020. P. 763—768.
50. Khitrov E. G., Iliushenko D. A., Kalistratov A. V. Deviation of resulting load of forestry vehicle from the normal to the bearing surface // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Series «All-Russian Scientific-Practical Conference with International Participation "Actual Issues of Transport in the Forest Sector"». Saint Petersburg, 2020. P. 012015.
51. Theoretical model for evaluation of tractive performance of forestry machine's wheel / V. Ivanov, M. Stepanishcheva, E. Khitrov [et al.] // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings. Albena, Bulgaria, 2018. P. 997—1004.
52. Environment-friendly logging in the context of water logged soil and knob-and-ridge terrain / V. A. Ivanov, I. V. Grigorev, G. D. Gasparyan [et al.] // Journal of Mechanical Engineering Research and Developments. 2018. Vol. 41, no. 2. P. 22—27.
53. Modelling of indenter pressed into heterogeneous soil / A. Yu. Zhuk, A. M. Hahina, I. V. Grigorev [et al.] // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. Vol. 13, no. S8. P. 6419—6430.
54. Mokhirev A., Mazurkin P., Rukomojnikov K. Factor analysis of the parameters of the ergatic natural-production system of the carting out of timber assortments // International Journal of Forest Engineering. 2022. Vol. 33, no. 2. P. 155—168.
55. Justification of transport and logistics routes for the movement of natural resources in order to minimize the impact on the environment / S. O. Medvedev, A. P. Mokhirev, M. A. Zyryanov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall. Krasnoyarsk, 2021. P. 52015.
56. Modeling of the process of collection, sorting and transportation of logging residues at the logging area / A. Mokhirev, M. Zyrjanov, S. Medvedev [et al.] // Journal of Applied Engineering Science. 2021. Vol. 19, no. 1. P. 114—118.

References

1. Grigorev I. «Amkodor». Real prospects of domestic forest engineering. *LesPromInform*, 2022, no. 4 (166), pp. 16—21. (In Russ.)
2. Grigorev I., Grigoreva O. «Amkodor-Onego» — another year of progressive development in difficult conditions. *LesPromInform*, 2023, no. 4 (174), pp. 38—40. (In Russ.)

3. Grigorev I., Ivanov V., Khitrov E., Kalistratov A., Bozhbov V. New approach for forest production stocking based on energy cost. *14th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2014*. Sofia, Bulgaria, 2014, pp. 407—414.
4. Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Rudov S. E., Davtyan A. B. Ways to improve the efficiency of forest machines. *Energy: economics, technology, ecology*, 2020, no. 1, pp. 55—63. (In Russ.)
5. Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Churakov A. A. Effective technologies and systems of machines for low-volume wood blanks. *Energy: economics, technology, ecology*, 2018, no. 2, pp. 61—66. (In Russ.)
6. Alexandrov I. K., Grigorev I. V., Ivanov V. A., Elizarov Yu. M., Chudnov Yu. N. Methodology for determining the fuel efficiency of gasoline-powered saws. *Bulletin of KrasGAU*, 2010, no. 2 (41), pp. 112—117. (In Russ.)
7. Grigorev I. V. Parameters and performance indicators of a promising forwarder for low-volume logging. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2018, vol. 6, no. 4 (40), pp. 21—25. (In Russ.)
8. Grigorev I. V., Churakov A. A. Improving the design of an active forwarder semi-trailer based on an agricultural wheeled tractor. *Transport and transport-technological systems. Materials of the International Scientific and Technical Conference*. Ed. by N. S. Zakharov. Tyumen, 2018, pp. 84—88. (In Russ.)
9. Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Nikiforova A. I., Glukhovskiy V. M. Promising directions for the development of technological processes of logging operations. *Proceedings of BSTU. No. 2: Forestry and woodworking industry*, 2016, no. 2 (184), pp. 109—116. (In Russ.)
10. Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Kunitskaya O. A. Wood processing in the cutting area: prospects for development. *Energy: economics, technology, ecology*, 2017, no. 2, pp. 27—33. (In Russ.)
11. Grigorev I. V., Voynash S. A. Improving the efficiency of training operators of forest machines. *Forest exploitation and integrated use of wood. Collection of articles of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Krasnoyarsk, 2020, pp. 62—66. (In Russ.)
12. Kalyashov V. A., Do Tuan A., Khitrov E. G., Grigoreva O. I., Guryev A. Yu., Novgorodov D. V. Modern systems of machines and technologies of wood harvesting and reforestation in conditions of mountain cutting areas. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 1—47. (In Russ.)
13. Grigorev I. V. Modern problems of import substitution in forest engineering of the Russian Federation. *Innovations in the chemical-forest complex: trends and prospects of development. Materials of the All-Russian Scientific and practical Conference*. Editors: Yu. A. Bezrukikh, E. V. Melnikova. Krasnoyarsk, 2022, pp. 165—169. (In Russ.)
14. Budnik P. V. Substantiation of technological solutions that increase the efficiency of harvesting sortings and logging waste, based on functional and technological analysis: abstract diss. ... Candidate of Technical Sciences. Petrozavodsk, PetrSU, 2011. 22 p. (In Russ.)
15. Budnik P. V., Skrypnik V. I. Substantiation of the masses and volumes of bundles of trees trilled by a felling-skidding-processing machine taking into account natural production conditions and logging areas. *Actual problems of the forest complex*, 2010, no. 27, pp. 3—6. (In Russ.)
16. Shegelman I. R., Budnik P. V. Justification of the departure of the manipulator and the modes of operation of the felling-skidding-processing machine. *Scientific notes of Petrozavodsk State University*, 2011, no. 4 (117), pp. 81—83. (In Russ.)
17. Budnik P. V. Justification of the maximum departure of the manipulator of the felling-skidding-processing machine for various natural production conditions. *Severgeoecotech-2011: Materials of the XII International Youth Scientific Conference*: In 5 parts. Ukhta, 2011, pp. 16—21. (In Russ.)

18. Patyakin V. I., Grigorev I. V., Redkin A. K. [et al.]. *Technology and machines of logging operations: Textbook for universities*. Saint Petersburg, GPU, 2012. 362 p. (In Russ.)
19. Tsygarova M. V., Grigorev I. V. *Machines for logging operations. Part I: Technological equipment and techniques of skidding tractors Textbook*. Ukhta, UGTU, 2011. 128 p. (In Russ.)
20. Grigorev I. V., Nikiforova A. I., Grigoreva O. I. Comparison of single-machine complexes for wood sorting. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, Voronezh, 2015, vol. 3, no. 9-2 (20-2), pp. 125—128. (In Russ.)
21. Grigorev I. V., Vinokurov S. L. Comparison of variants of machine systems for low-volume logging. *Herald of AGATHU*, 2021, no. 3 (3), pp. 51—62. (In Russ.)
22. Grigorev I. V., Tikhonov I. I., Kunitskaya O. A. *Technology and machines of logging operations. Textbook on course design for students of bachelor's degree courses 250400 «Technology of logging and wood processing industries», profile «Forest engineering»*. Saint Petersburg, SPbGLTU, 2013. 132 p. (In Russ.)
23. Grigorev I. V., Redkin A. K., Valyazhonkov V. D., Matrosov A. V. *Technology and equipment of timber industries. Technology and machines of logging operations: Textbook*. Saint Petersburg, LTA Publishing House, 2010. 330 p. (In Russ.)
24. Grigorev I. V. Directions of improvement of harvester heads. *Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the Sixth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation*. Petrozavodsk, 2020, pp. 45—47. (In Russ.)
25. Grigorev I. V. Calibration of harvester heads. *Science and innovation: vectors of development: Materials of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists. Collection of scientific articles: In 2 books*. Barnaul, 2018, pp. 78—82. (In Russ.)
26. Tambi A. A., Grigorev I. V. Improving the efficiency of the harvester by eliminating the loss of time for the preparation of the cutting tool. *Repair. Recovery. Modernization*, 2020, no. 4, pp. 12—16. (In Russ.)
27. Kunitskaya O. A., Chernutsky N. A., Derbin M. V., Rudov S. E., Grigorev I. V., Grigoreva O. I. *Machine harvesting of wood by Scandinavian technology*. Saint Petersburg, Publishing and Printing Association of Higher Educational Institutions, 2019. 192 p. (In Russ.)
28. Grigorev I. V. *Reducing the negative impact on the soil of wheeled skidding tractors by substantiating the modes of their movement and technological equipment*. Saint Petersburg, LTA, 2006. 236 p. (In Russ.)
29. Grigorev I. V. The influence of the skidding method on the operational efficiency of the skidding tractor. abstract of the diss. ... Candidate of Technical Sciences. Saint Petersburg, LTA, 2000. 20 p. (In Russ.)
30. Medvedev S. O., Zyryanov M. A., Mokhirev A. P., Kunitskaya O. A., Voronov R. V., Storodubtseva T. N., Grigoreva O. I., Grigorev I. V. Russian timber industry: current situation and modelling of prospects for wood biomass use. *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, 2022, vol. 17, no. 5, pp. 745—752.
31. Rudov S. E., Voronova A. M., Chemshikova J. M., Teterevleva E. V., Kruchinin I. N., Dondokov Yu. Zh., Khaldeeva M. N., Burtseva I. A., Danilov V. V., Grigorev I. V. Theoretical approaches to logging trail network planning: increasing efficiency of forest machines and reducing their negative impact on soil and terrain. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 2019, vol. 16, no. 4, pp. 61—75.
32. Dobretsov R., Grigorev I., Ivanov V., Zhuk A., Verner N., Grigorev G., Storodubtseva T., Dmitrieva N. Improvement of the forest tracked vehicles' control by using impulse control technology for the steering mechanism. *European Chemical Bulletin*, 2021, vol. 10, no. 1, pp. 21—26.

33. Khakhina A. M., Grigorev I. V., Dolmatov N. P., Makuev V. A., Kruchinin I. N., Storodubtseva T. N., Burgonutdinov A. M., Markov O. B. Predicting the passability of wheeled tractors. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 2022, vol. 9, no. 5, pp. 1233—1242.
34. Zyryanov M., Grigorev I., Medvedev S., Mokhirev A., Egipko S., Perfiliev P., Savvateeva I. The experimental study of logging residue stock on logging sites following clear-cutting using a sorting machine system. *International Journal of Simulation and Process Modelling*, 2023.
35. Grigorev I., Kunickaya O., Tikhonov E., Hertz E., Druzyanova V., Timokhova O., Ivanov V., Kruchinin I. Dynamic impact of wheeled skidders on forest soil in felling areas. *Journal of Terramechanics*, 2022, vol. 101, pp. 1—9.
36. Grigorev I., Burgonutdinov A., Makuev V., Tikhonov E., Shvetsova V., Timokhova O., Revyako S., Dmitrieva N. The theoretical modeling of the dynamic compaction process of forest soil. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 2022, vol. 19, no. 3, pp. 2935—2949.
37. Dobretsov R., Grigorev I., Tikhonov E., Mikheev A., Khakhina A., Storodubtseva T., Shiryayev S., Burgonutdinov A. Impulse control technology for improving steering control systems of the tracked vehicles. *International Review of Automatic Control*, 2021, vol. 14, no. 3, pp. 172—178.
38. Kunickaya O., Hertz E., Kruchinin I., Tikhonov E., Ivanov N., Dolmatov N., Zorin M., Grigorev I. Pressure control systems for tyre preservation in forestry machinery and forest soils. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 2021, vol. 18, no. 3, pp. 95—102.
39. Rukomojnikov K., Mokhirev A., Burgonutdinov A., Kunickaya O., Grigorev I., Voronov R. Network planning of the technological chain for timber land development. *Journal of Applied Engineering Science*, 2021, vol. 19, no. 2, pp. 407—414.
40. Grigorev I., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Tikhonov E., Makuev V., Egipko S., Hertz E., Zorin M. Modeling the effect of wheeled tractors and skidded timber bunches on forest soil compaction. *Journal of Applied Engineering Science*, 2021, vol. 19, no. 2, pp. 439—447.
41. Rudov S. E., Grigorev I. V., Kunickaya O. A., Druzyanova V. P., Ivanov A. K., Okhlopko M. K., Pankov V. Y., Pekhutov A. S., Ivanov A. P., Borovikov R. G. Specific features of accounting of state of the massive of the frozen soil grounds under cyclic loads. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2019, vol. 25, no. Suppl. 2, pp. 191—205.
42. Grigoreva O., Runova E., Ivanov V., Alyabyev A., Hertz E., Voronova A., Shadrina S., Grigorev I. Influence of different forest management techniques on the quality of wood. *Journal of Renewable Materials*, 2021, vol. 9, no. 12, pp. 2175—2188.
43. Grigorev I., Kunickaya O., Prosuzhih A., Kruchinin I., Shakirzyanov D., Shvetsova V., Markov O., Egipko S. Efficiency improvement of forest machinery exploitation. *Diagnostyka*, 2020, vol. 21, no. 2, pp. 95—109.
44. Grigorev I., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Burmistrova O., Druzyanova V., Dolmatov N., Voronova A., Kotov A. Assessment the effect of skidding techniques on the ecological efficiency of the skidding tractor. *Diagnostyka*, 2020, vol. 21, no. 3, pp. 67—75.
45. Rudov S., Kunickaya O., Grigorev I., Burgonutdinov A., Kruchinin I., Prosuzhih A., Dolmatov N., Dmitrieva N. The mathematical model of forestry machines impact on cryolitozone forest soils. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 2020, vol. 17, no. 4, pp. 89—95.
46. Grigorieva O. I., Runova E. M., Storodubtseva T. N., Urazova A. F., Voronova A. M., Ivanov V. A., Shvetsova V. V., Grigorev I. V. Comparative analysis of thinning techniques in Garchinsky forestry. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 2022, vol. 9, no. 2, pp. 762—770.

47. Rego G. E., Voronov R. V., Grigorieva O. I. Algorithms for calculating schemes of transport routes in a felling area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2. Series: «II All-Russian Scientific-Technical Conference "Digital Technologies in Forest Sector"», Saint Petersburg, 2021, p. 012025.
48. Khitrov E., Grigorev G., Dmitrieva I. Theoretical estimation of soil resistance to forestry vehicles turning. *20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020*. Sofia, Bulgaria, 2020, pp. 757—762.
49. Grigorev G., Dmitrieva I., Khitrov E. Theoretical evaluation of rut depth components caused by forest soil shear and compaction. *20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020*. Sofia, Bulgaria, 2020, pp. 763—768.
50. Khitrov E. G., Iliushenko D. A., Kalistratov A. V. Deviation of resulting load of forestry vehicle from the normal to the bearing surface. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Series: «All-Russian Scientific-Practical Conference with International Participation "Actual Issues of Transport in the Forest Sector"», Saint Petersburg 2020, p. 012015.
51. Ivanov V., Stepanishcheva M., Khitrov E., Iliushenko D. Theoretical model for evaluation of tractive performance of forestry machine's wheel. *18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings*. Albena, Bulgaria, 2018, pp. 997—1004.
52. Ivanov V. A., Grigorev I. V., Gasparyan G. D., Manukovsky A. Y., Zhuk A. Yu., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Environment-friendly logging in the context of water logged soil and knob-and-ridge terrain. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 2018, vol. 41, no. 2, pp. 22—27.
53. Zhuk A. Yu., Hahina A. M., Grigorev I. V., Ivanov V. A., Gasparyan G. D., Manukovsky A. Y., Kunitskaya O. A., Danilenko O. K., Grigoreva O. I. Modelling of indenter pressed into heterogeneous soil. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018, vol. 13, no. S8, pp. 6419—6430.
54. Mokhirev A., Mazurkin P., Rukomojnikov K. Factor analysis of the parameters of the ergatic natural-production system of the carting out of timber assortments. *International Journal of Forest Engineering*, 2022, vol. 33, no. 2, pp. 155—168.
55. Medvedev S. O., Mokhirev A. P., Zyryanov M. A., Lyshko A. S. Justification of transport and logistics routes for the movement of natural resources in order to minimize the impact on the environment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall. Krasnoyarsk, 2021, p. 52015.
56. Mokhirev A., Zyrjanov M., Medvedev S., Rjabova T. Modeling of the process of collection, sorting and transportation of logging residues at the logging area. *Journal of Applied Engineering Science*, 2021, vol. 19, no 1, pp. 114—118.

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7484

УДК 630*65.011.54

Статья

Многоцелевая оптимизация параметров комбинированного корпуса плуга

Зимарин Сергей Викторович

кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), sezimarin@yandex.ru

Четверикова Ирина Владимировна

кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), chivles@rambler.ru

Хрипченко Михаил Сергеевич

кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), at-conf@yandex.ru

Получена: 1 ноября 2023 / Принята: 21 мая 2024 / Опубликовано: 10 июня 2024

Аннотация: Статья посвящена обоснованию оптимальных технологических параметров комбинированного корпуса плуга для основной обработки почвы. В рамках рациональной энергосберегающей технологии лесовосстановительных работ предлагаемый корпус плуга будет входить в конструкции многофункциональных орудий, позволяющих проводить качественную обработку почвы на нераскорчёванных вырубках. Качественная обработка почвы подразумевает полный оборот, укладку рядом с открытой бороздой почвенного пласта при максимальном сохранении его целостности. В работе проведены экспериментальные исследования по определению основных характеристик оценки качества обработки почвы предлагаемым орудием, в частности, поворот почвенного пласта и коэффициент его деформации, а также продольное и поперечное перемещение почвенной массы. Представлены результаты исследований зависимости угла поворота почвенного пласта, коэффициента его деформации, продольного и поперечного перемещения почвенной массы от трёх основных технологических параметров орудия, таких как угол атаки, угол наклона дискового корпуса и угол поворота отвала. Установлено, что наибольшее влияние на вышеназванные характеристики работы орудия оказывает угол атаки, менее значимое оказывает угол наклона дискового корпуса, совсем незначительно

на характеристики работы орудия влияет угол поворота отвала. Установлено, что при этом угол атаки и угол наклона дискового корпуса оказывают противоречивое влияние на процесс обработки. Так, например, увеличение угла атаки и снижение угла наклона дискового корпуса, с одной стороны, повышают оборот почвенного пласта, с другой — снижают его сохранность. В данной работе достигнута поставленная авторами первоначальная цель — лабораторное исследование процесса оборота и деформации почвенного пласта корпусом лесного плуга и определение его оптимальных параметров, которые влияют на обеспечение качественной обработки почвы. Получены регрессионные модели, позволяющие определять оптимальные технологические параметры комбинированного корпуса плуга, а именно: угол атаки 36° , угол наклона дискового корпуса 15° , угол поворота отвала 20° .

Ключевые слова: лесной комплекс; основная обработка почвы; нераскорчёванная вырубка; дисковые орудия; корпус плуга

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7484

Article

Multi-purpose optimization of parameters of the plow combined body

Sergey Zimarin

PhD in engineering, associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), sezimarin@yandex.ru

Irina Chetverikova

PhD in engineering, associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), chivles@rambler.ru

Michael Khripchenko

PhD in engineering, associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), at-conf@yandex.ru

Received: 1 November 2023 / Accepted: 21 May 2024 / Published: 10 June 2024

Abstract: The article substantiates the optimal technological parameters of the plow combined body used for basic tillage. As part of the rational energy-saving technology of reforestation, the proposed plow body will be included in the design of multifunctional tools that allow for high-quality tillage in uncleared stands. The process of high-quality tillage includes a full turn of a soil layer and its laying next to an open furrow with the highest possible preservation of the layer's integrity. Experimental studies have been performed to determine the main characteristics of assessing the quality of tillage with the proposed tool, in particular, the rotation of the soil layer and its deformation coefficient, as well as the longitudinal and transverse displacement of the soil mass. The authors determined the dependences of the rotation angle of the soil layer, the coefficient of its deformation and the longitudinal and transverse displacement of the soil mass on three main technological parameters of the tool, such as: the approach angle and the angle of inclination of the disk housing, and the turning angle of the plow moldboard. It has been established that the approach angle has the greatest influence on the above-mentioned characteristics of the plow, the angle of inclination of the disk housing has a less significant effect, and the turning angle of the plow moldboard has a very insignificant effect on the characteristics of the plow. It has been found that in this case, the approach angle and the angle of inclination of the disk housing have a contradictory effect on the treatment process. For example, an increase

in the approach angle and a decrease in the angle of inclination of the disk housing increase the turnover of the soil layer while reducing its safety. In this work, the original goal set by the authors has been achieved: to study the process of turnover and deformation of the soil layer by the forest plow body and to determine its optimal parameters that affect high-quality of tillage. Regression models have been obtained that allow determining the optimal technological parameters of the plow combined body, namely: the approach angle 360, the angle of inclination of the disk body 150, the moldboard turning angle 200.

Keywords: forest complex; basic tillage; uncleared stands; disk tools; plow body

1. Введение

Восстановление лесов является глобальной проблемой и важнейшей задачей лесного комплекса. Одним из главных направлений совершенствования существующих технологий и техники для лесовосстановления является ресурсосбережение с уменьшением отрицательных последствий от воздействия машин на лесную среду. Актуальной технологией лесовосстановления на нераскорчёванных вырубках является бороздная обработка почвы, позволяющая избежать выполнения материально затратной операции по корчеванию пней. При этом существенно снижается негативное экологическое воздействие на почву, т. к. вместе с пнями удаляется верхний гумусированный слой почвы, а расчищенная площадь приобретает ложбинный профиль, что приводит к локальному заболачиванию. Лесные культуры, высаженные в таких условиях, слабо развиваются и зачастую гибнут [1—5].

В настоящее время бороздная вспашка выполняется лемешными и дисковыми плугами. Лемешные плуги способны полностью оборачивать почвенный пласт, сохраняя его целостность. Таким образом, обеспечивается заделка растительных остатков в верхний слой почвы, что ведёт к накоплению гумуса. При этом лемешные плуги на нераскорчёванных вырубках имеют низкую проходимость, т. к. плохо преодолевают встречающиеся препятствия и испытывают большие ударные нагрузки при встрече с ними, что приводит к выходу их из строя. Дисковые плуги, имея высокую проходимость в данных условиях работы, не способны обеспечить качественную обработку почвы в плане оборота и сохранности почвенного пласта ни при каких своих конструктивно-технологических параметрах [6—10].

Цель работы — лабораторное исследование процесса оборота и деформации почвенного пласта корпусом лесного плуга и определение его оптимальных параметров [11—16], обеспечивающих качественную обработку почвы (полностью обёрнутый почвенный пласт уложить рядом с открытой бороздой на необработанную поверхность почвы, сохранив его целостность).

2. Материалы и методы

Конструкция предлагаемого комбинированного корпуса плуга (рисунок 1) имеет стойку 1; в ступице стойки на подшипниках установлен сферический диск 2, который заторможен посредством пластинчатой пружины 4; к сферическому диску жёстко прикреплён отвал 3 с возможностью регулировки по высоте и углу наклона. Корпус плуга работает следующим образом: заторможенный сферический диск подрезает почвенный пласт; почвенный пласт, двигаясь по рабочей поверхности корпуса плуга, оборачивается и укладывается рядом с бороздой, сохраняя свою целостность под действием на него отвала. При встрече с препятствием сферический диск растормаживается и свободно перекатывается через препятствие, после преодоления препятствия сферический диск тормозится пластинчатой

пружиной. Такая конструкция позволяет сочетать достоинства дисковых орудий по преодолению препятствий на нераскорчёванных вырубках и лемешных плугов по качеству обработки почвы.

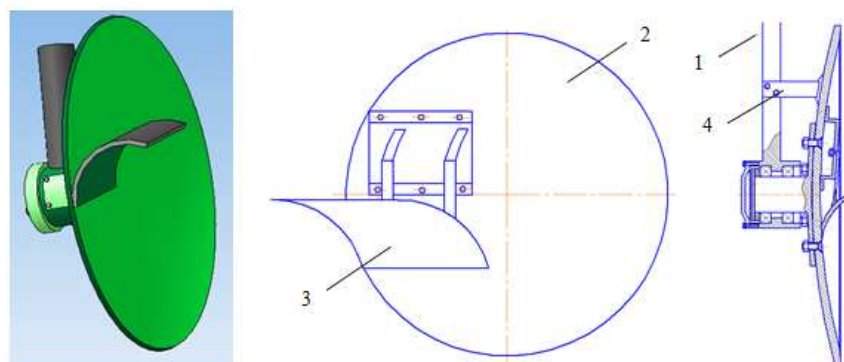


Рисунок 1. Конструкция корпуса плуга: 1 — стойка; 2 — сферический диск; 3 — отвал; 4 — пластинчатая пружина

Figure 1. Plow body design: 1 — rack; 2 — spherical disc; 3 — moldboard; 4 — plate spring

Качество обработки почвы экспериментальным корпусом плуга оценивалось методом закладки в почву кубиков со стороной 10 мм. Кубики закладывались поперёк движению орудия на удалении друг от друга 50 мм. Координаты шашек определялись профиломером-координатором с точностью замера 1 мм (фото 1). Координаты кубиков после прохода орудия замерялись следующим образом: X — в направлении движения корпуса плуга, Y — перпендикулярно направлению движения в горизонтальной плоскости; Z — перпендикулярно направлению движения в вертикальной плоскости.



Фото 1. Профиломер-координатор

Photo 1. Coordinator Profiler

Принятые характеристики для оценки качества обработки почвы:

- угол поворота пласта (ψ) характеризует способность комбинированного корпуса плуга оборачивать пласт, угол определялся из выражения (1):

$$\psi = \frac{\psi_1 + \psi_2 + \dots + \psi_n}{n-1} = \frac{\sum \arctg \frac{z_{k_i} - z_{k_1}}{y_{k_i} - y_{k_1}}}{n-1}, \quad (1)$$

где z_{k_1} , y_{k_1} — конечная вертикальная и поперечная координаты первой меченой шашки; z_{k_i} , y_{k_i} — конечная вертикальная и поперечная координаты других меченых шашек; n — число меченых шашек;

- коэффициент деформации почвенных слоёв ($\kappa_{\partial.}$) показывает, насколько под действием рабочего органов изменяется расстояние между частицами, располагавшимися до обработки на одной горизонтальной линии. Следовательно, коэффициент отражает сохранность почвенного пласта после воздействия на него корпуса плуга, коэффициент находится из выражения (2):

$$\kappa_{\partial.} = \frac{\sum \sqrt{(x_{k_i} - x_{k_{i-1}})^2 + (y_{k_i} - y_{k_{i-1}})^2}}{y_1 - y_n}, \quad (2)$$

где x_{k_i} — конечная продольная координата меченой шашки; y_{k_i} — конечная поперечная координата меченой шашки; y_1 — начальная поперечная координата первой меченой шашки; y_n — начальная поперечная координата последней меченой шашки;

- поперечное перемещение почвенной массы (y) показывает конечное положение слоя почвы, отражает оборот пласта и его сохранность (осыпание почвы в борозду), определяется как средняя арифметическая величина перемещения меченых частиц от края борозды из выражения (3):

$$y = \frac{\sum y_{k_i}}{n} - y_o, \quad (3)$$

где y_{k_i} — конечные поперечные координаты меченых шашек; y_o — координата края борозды; n — число частиц верхнего ряда;

- продольное перемещение почвенной массы (x) оказывает влияние на энергетику и интенсивность перемешивания почвенных слоёв, определяется как средняя арифметическая величина перемещения меченых шашек из выражения (4):

$$x = \frac{\sum x_{k_i}}{n} - x_o, \quad (4)$$

где x_{k_i} — конечные продольные координаты меченых шашек; n — число меченых шашек.

Исследования были проведены в почвенном канале ВГЛТУ, загруженном почвой типа лёгких суглинков: твёрдость почвы 18 кг/см^2 , влажность 8 %, глубина обработки 15 см; конструктивные характеристики сферического диска комбинированного корпуса: наружный диаметр 770 мм, радиус кривизны 1200 мм.

Исследования предполагали построение регрессионных моделей влияния параметров комбинированного корпуса плуга (угол атаки, угол наклона корпуса плуга и угол поворота отвала) на оборот почвенного пласта и коэффициента его деформации на продольное и поперечное перемещение почвенной массы; с последующей оптимизацией вышеуказанных параметров корпуса. Для решения поставленной задачи был реализован полный факторный эксперимент. Обозначение варьируемых факторов и их уровни представлены в таблице 1. Функции отклика: y_1 , мм — продольное перемещение почвенной массы; y_2 — коэффициент деформации почвенного пласта; y_3 , град. — поворот почвенного пласта; y_4 , мм — продольное перемещение почвенной массы.

Таблица 1. Определение уровней и интервалов варьирования факторов

Table 1. Levels and intervals of variation of factors

Фактор			Уровни факторов			Интервал варьирования
Наименование	Обозначение					
	натуральное	нормализованное	верхний	основной	нижний	
Угол атаки корпуса, град.	α	x_1	45	40	35	5
Угол наклона корпуса, град.	β	x_2	20	10	0	10
Угол поворота отвала, град.	θ	x_3	20	10	0	10

3. Результаты

Для проверки нормальности распределения выходных величин была проведена серия из 30 опытов при $\alpha = 35^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$, результаты которых представлены в таблице 2.

Выполним проверку выборок y_1 , y_2 , y_3 , y_4 на выбросы по лимитам межквартильного размаха, статистики выборок представлены в таблице 3.

Таблица 2. Результаты серии опытов

Table 2. The experimental results

№	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	№	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	№	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄
1	286	1,861	146	185	11	289	1,888	146	187	21	283	1,744	145	194
2	277	1,999	143	189	12	280	1,78	145	197	22	283	1,884	144	187
3	282	1,81	147	189	13	284	1,944	146	186	23	290	1,938	146	194
4	284	1,769	144	191	14	279	1,804	143	185	24	280	1,893	144	192
5	283	1,828	149	192	15	282	1,929	143	190	25	285	1,803	142	190
6	284	1,707	148	188	16	275	1,97	148	184	26	285	1,738	145	190
7	280	1,947	146	195	17	283	1,855	143	193	27	288	1,838	141	194
8	292	1,823	146	188	18	273	1,828	147	190	28	287	1,897	148	191
9	285	1,942	144	191	19	286	1,926	145	190	29	292	1,844	141	189
10	286	1,832	144	191	20	277	1,807	149	183	30	287	1,886	145	189

Таблица 3. Статистики выборок

Table 3. Sample statistics

Показатели	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄
Первый квартиль (Q ₁)	280	1,8055	143,5	187,5
Третий квартиль (Q ₃)	286,5	1,9115	146	191,5
Межквартильный размах (IQR)	6,5	0,106	2,5	4
Нижний лимит	270	1,6465	139,75	181,5
Верхний лимит	296	2,0705	149,75	197,5
Минимум	273	1,707	141	197
Максимум	294	1,999	149	183
Эксцесс	–0,038	–0,61	–0,31	–0,18
Асимметричность	–0,07	–0,05	–0,2	–0,05

Максимальные и минимальные значения во всех выборках находятся в границах своих лимитов, следовательно, выборки не содержат выбросы.

Проанализируем показатели для откликов y_1 , y_2 , y_3 , y_4 , выполнив построение гистограмм распределения частот и полигонов частот (рисунки 2, 3, 4, 5); при этом табличные критические значения асимметрии (As) и эксцесса (Ex) по абсолютной величине для всех откликов превышают расчётные: $As_{\text{крит}} > As_{\text{расч}}$ и $Ex_{\text{крит}} > Ex_{\text{расч}}$ (для y_1 : $0,865 > 0,04$; $0,661 > 0,07$; для y_2 : $0,865 > 0,05$; $0,661 > 0,62$; y_3 : $0,865 > 0,2$; $0,661 > 0,32$; y_4 : $0,865 > 0,19$; $0,661 > 0,05$), что говорит о нормальном распределении выходных величин.



Рисунок 2. Графический анализ выборки для отклика y_1

Figure 2. Graphical Sample Analysis for a Response y_1

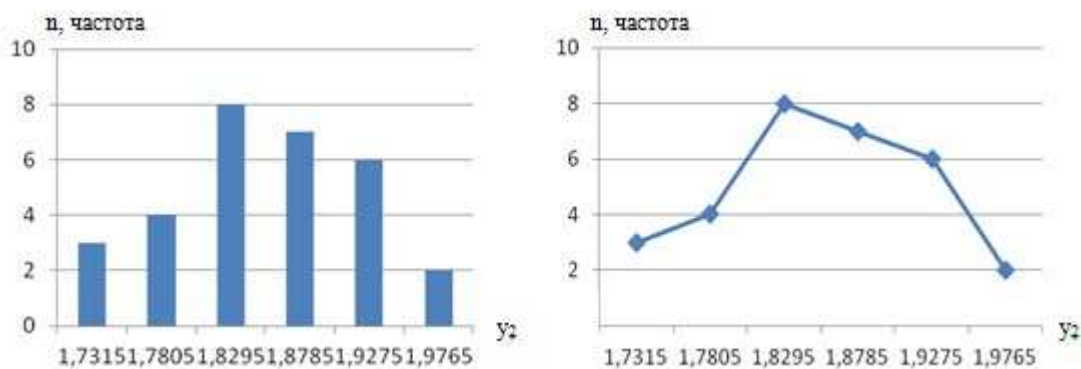


Рисунок 3. Графический анализ выборки для отклика y_2

Figure 3. Graphical Sample Analysis for a Response y_2

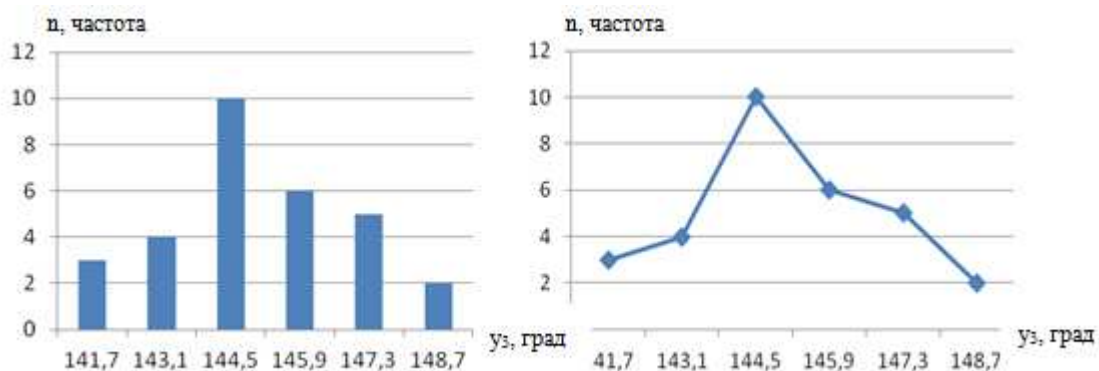


Рисунок 4. Графический анализ выборки для отклика y_3

Figure 4. Graphical Sample Analysis for a Response y_3



Рисунок 5. Графический анализ выборки для отклика y_4

Figure 5. Graphical Sample Analysis for a Response y_4

Выполним проверку по критерию χ^2 -Пирсона для утверждения гипотезы нормального распределения выходных величин. Для этого разбиваем выборку на шесть интервалов (таблица 4), количество интервалов (групп разбиения) определяем по формуле Стёрджесса: $m = 1 + 3,222 \cdot \lg N = 1 + 3,222 \cdot \lg 30 \approx 6$, где m — количество интервалов; N — число опытов (в нашем случае $N = 30$).

Таблица 4. Расчёт критерия Пирсона

Table 4. Calculation of the Pearson criterion

Для отклика y_1 (интервал с шагом $h = 3,5$)						Выражение для расчёта критерия Пирсона
Интервал	$y_{iл}$	$y_{i пр}$	y_i	p_i	p'_i	
1	273	276,5	274,75	2	1,62495	$\chi^2_{расч} = \sum_{i=1}^m \frac{(p_i - p'_i)^2}{p'_i}$ $p'_i = \frac{h \cdot N}{\sigma_x^e} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z_i^2}{2}}$ $z_i = \frac{y_i - y_{cp}}{\sigma_x^e}$
2	276,5	280	278,25	6	4,790132	
3	280	283,5	281,75	6	8,224343	
4	283,5	287	285,25	10	8,224343	
5	287	290,5	288,75	3	4,790132	
6	290,5	294	292,25	3	1,62495	
Для отклика y_2 (интервал с шагом $h = 0,049$)						
1	1,707	1,756	1,73	3	1,69	
2	1,756	1,805	1,78	4	4,80	
3	1,805	1,854	1,82	8	8,09	
4	1,854	1,903	1,87	7	8,09	
5	1,903	1,952	1,92	6	4,80	
6	1,952	2,001	1,97	2	1,69	

Для отклика y_3 (интервал с шагом $h = 1,4$)						$y_{cp} = \sum_{i=1}^m y_i p_i / \sum_{i=1}^m p_i$ $\sigma_x^e = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^m y_i^2 p_i / N\right)} - y_{cp}^2$	
1	141	142,4	141,7	3	1,84		2,11
2	142,4	143,8	143,1	4	5,17		
3	143,8	145,2	144,5	10	8,44		
4	145,2	146,6	145,9	6	8,00		
5	146,6	148	147,3	5	4,40		
6	148	149,4	148,7	2	1,40		
Для отклика y_4 (интервал с шагом $h = 2,4$)							
1	183	185,4	184,2	4	2,059902		3,15
2	185,4	187,8	186,6	3	5,723091		
3	187,8	190,2	189	11	8,916949		
4	190,2	192,6	191,4	6	7,79118		
5	192,6	195	193,8	5	3,817611		
6	195	197,4	196,2	1	1,049014		

Примечание: $y_{i\ л}$, $y_{i\ пр}$ — левая и правая границы интервала; y_i — средняя интервала; p_i — эмпирическая частота; p'_i — теоретическая частота; z_i — стандартизированная средняя интервала; $y_{ср}$ — среднее взвешенное значение выборки; σ_x^e — взвешенное стандартное отклонение $\chi_{расч}^2$; расчётное значение критерия Пирсона. Табличное критическое значение критерия χ^2 -Пирсона равно 7,815, исходя из того, что расчётные значения критериев не превосходят табличное (для y_1 : $7,815 > 3,21$; для y_2 : $7,815 > 1,65$; для y_3 : $7,815 > 2,11$; для y_4 : $7,815 > 3,15$), принимаем гипотезу нормального распределения случайной величины в выборках.

Матрица планирования полного факторного эксперимента представлена в таблице 5, для исключения систематических ошибок проведена рандомизация опытов с помощью таблицы случайных чисел с учётом количества дублированных опытов.

Таблица 5. Матрица планирования эксперимента

Table 5. Experiment planning matrix

№	Рандомизация					x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	y_{1j}	S^2_{1j}	y_{2j}	S^2_{2j}	y_{3j}	S^2_{3j}	y_{4j}	S^2_{4j}
	1	2	3	4	5														
1	4	2	1	7	5	-1	-1	-1	1	1	1	285	33	1,84	0,0016	145	47	191	15
2	2	4	3	5	3	1	-1	-1	-1	-1	1	592	34	2,90	0,0013	178	5	286	19
3	3	6	4	4	8	-1	1	-1	-1	1	-1	254	8,3	1,45	0,0019	135	9	98	39
4	7	8	2	6	4	1	1	-1	1	-1	-1	492	50	2,44	0,0031	170	3	131	15
5	8	5	7	2	6	-1	-1	1	1	-1	-1	316	29	1,82	0,0055	153	24	170	39
6	1	7	8	3	1	1	-1	1	-1	1	-1	618	49	2,85	0,0052	178	6	276	83
7	5	3	6	1	2	-1	1	1	-1	-1	1	256	12	1,41	0,0021	138	44	96	25
8	6	1	5	2	7	1	1	1	1	1	1	499	21	2,47	0,0022	173	3	126	37

Примечание: y_{1j} , S^2_{1j} , y_{2j} , S^2_{2j} , y_{3j} , S^2_{3j} , y_{4j} , S^2_{4j} — соответственно среднее значение и дисперсия откликов в опытах. Регрессионные модели влияния параметров комбинированного корпуса на отклики будем искать в виде многочленов: $y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3$. Расчётные коэффициенты регрессии математических моделей представлены в таблице 6.

Таблица 6. Коэффициенты регрессии математических моделей

Table 6. Regression coefficients of the mathematical model

Отклик	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}
y_1	414,1	136,2	-39	8,2	-15,9	-0,15	-5,85
y_2	2,15	0,52	-0,21	-0,01	-0,008	0,0043	-4,55
y_3	158,6	16,05	-4,75	1,95	1,6	-1	-0,2
y_4	171,68	33,03	-59,1	-4,83	-17,38	1,025	2,98

Выполним построение регрессионных моделей, предварительно оценив однородность дисперсий опытов и значимость коэффициентов, затем адекватность модели, оценки математических моделей представлены в таблице 7. По G -критерию Кохрена проводим проверку однородности дисперсий опытов. Выбрав наибольшие дисперсии опытов, определим расчётное значение G -критерия. Неравенства $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$ выполняются для всех откликов, что позволяет сделать вывод об однородности дисперсий опытов.

Таблица 7. Оценка математических моделей

Table 7. Evaluation of mathematical models

Отклик	$S^2_{\text{наиб}}$	$G_{\text{расч}}$	$G_{\text{табл}}$	$S\{b_i\}$	$t_{\text{табл}} S\{b_i\}$	$F_{\text{расч}}$	$F_{\text{табл}}$
y_1	50	0,21	2,74	0,86	2,36	0,49	4,17
y_2	0,0055	0,24		0,008	0,023	0,69	
y_3	47	0,33		0,442	0,665	0,35	
y_4	83	0,30		0,92	2,53	1,03	

Примечание: $S^2_{\text{наиб}}$ — наибольшая дисперсия опытов; $G_{\text{расч}}$ — расчётный G -критерий Кохрена; $G_{\text{табл}}$ — табличный G -критерий Кохрена; $S\{b_i\}$ — среднее квадратичное отклонение коэффициентов регрессии; $t_{\text{табл}} S\{b_i\}$ — уровень значимости коэффициентов регрессии; $t_{\text{табл}}$ — критерий Стьюдента; $F_{\text{расч}}$ — расчётный критерий Фишера; $F_{\text{табл}}$ — табличный критерий Фишера.

Отбросив незначимые члены уравнений, получим регрессионные модели в виде выражений (5)—(8):

$$y_1 = 414,1 + 136,2x_1 - 39x_2 + 8,2x_3 - 15,9x_1x_2 - 5,85x_2x_3, \quad (5)$$

$$y_2 = 2,15 + 0,52x_1 - 0,21x_2, \quad (6)$$

$$y_3 = 158,6 + 16,05x_1 - 4,75x_2 + 1,95x_3, \quad (7)$$

$$y_4 = 171,68 + 33,03x_1 - 59,1x_2 - 4,83x_3 - 17,38x_1x_2 + 2,98x_2x_3. \quad (8)$$

Адекватность полученных моделей проверим по F -критерию Фишера, для всех моделей выполняются неравенства $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$, следовательно, модели считаем адекватными.

Из анализа модели (5) следует (рисунок 6): наиболее сильно на продольное перемещение почвенной массы оказывает влияние изменение угла атаки, существенное — изменение угла наклона; малозаметное — изменение угла поворота отвала (по абсолютной величине: $b_1 > b_2 > b_3$). При этом с увеличением угла атаки и угла поворота отвала продольное перемещение почвенной массы повышается, а с увеличением угла наклона — уменьшается ($b_1, b_3 > 0$; $b_2 < 0$); заметное влияние на изменение продольного перемещения почвенной массы оказывает двойное взаимодействие факторов x_1 и x_2 .

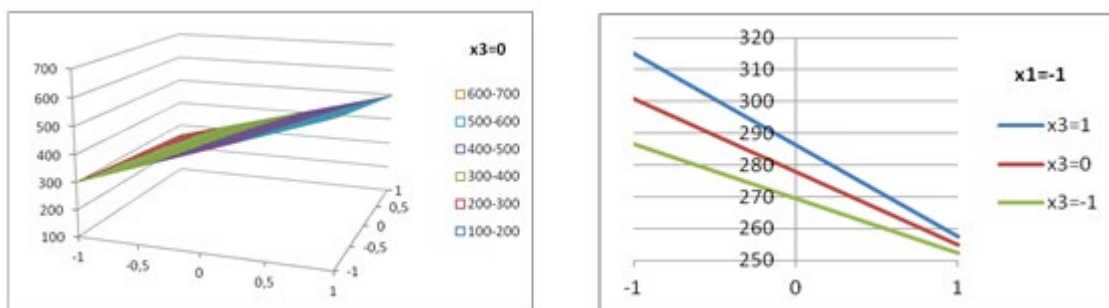


Рисунок 6. График зависимости продольного перемещения почвенной массы от параметров комбинированного корпуса плуга

Figure 6. Graph of the dependence of the longitudinal movement of the soil mass on the parameters of the combined plow body

Из анализа модели (6) следует (рисунок 7): наиболее определяющее влияние на деформацию почвенного пласта оказывает изменение угла атаки, заметное — изменение угла наклона; изменением угла поворота отвала можно пренебречь (по абсолютной величине: $b_1 > b_2$). При этом с увеличением угла атаки деформация пласта повышается, а с увеличением угла наклона — снижается ($b_1, b_3 > 0$; $b_2 < 0$). Поверхность отклика целевой функции y_2 может быть аппроксимирована плоскостью (незначимость коэффициентов $b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}$ и b_{123}).

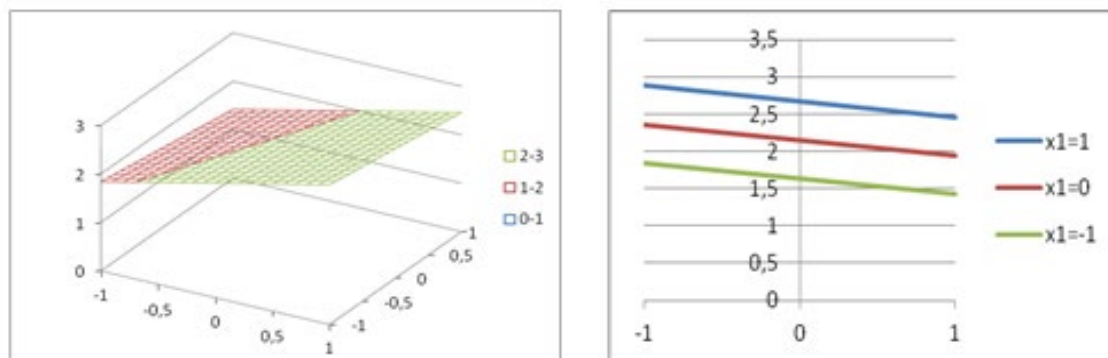


Рисунок 7. График зависимости деформации почвенного пласта от параметров комбинированного корпуса плуга

Figure 7. Graph of the dependence of the deformation of the soil layer on the parameters of the combined plow body

Из анализа модели (7) следует (рисунок 8): наибольшее влияние на оборот пласта оказывает изменение угла атаки, менее сильное — изменение угла наклона; наименьшее — изменение угла поворота отвала (по абсолютной величине: $b_1 > b_2 > b_3$). При этом с увеличением как угла атаки, так и угла поворота отвала оборот пласта повышается, а с увеличением угла наклона — уменьшается ($b_1, b_3 > 0$; $b_2 < 0$). Поверхность отклика целевой функции y_1 может быть аппроксимирована плоскостью (незначимость коэффициентов b_{12} , b_{13} , b_{23} и b_{123}).

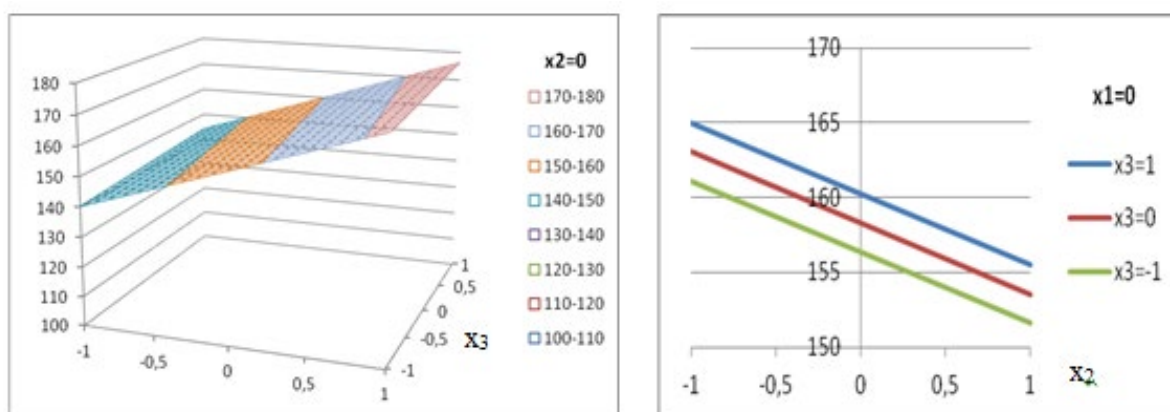


Рисунок 8. График зависимости оборота почвенного пласта от параметров комбинированного корпуса плуга

Figure 8. Graph of the dependence of the turnover of the soil layer on the parameters of the combined plow body

Из анализа модели (8) следует (рисунок 9): определяющим образом на процесс продольного перемещения почвенной массы оказывает влияние изменения угла наклона, менее заметное — изменение угла атаки; незначительное — изменение угла поворота отвала (по абсолютной величине: $b_2 > b_1 > b_3$). При этом с ростом угла наклона и угла поворота отвала продольное перемещение почвенной массы уменьшается, а с ростом угла атаки — повышается ($b_1, b_3 > 0$; $b_2 < 0$); заметное влияние на изменение поперечного перемещения почвенной массы оказывает двойное взаимодействие факторов x_1 и x_2 .

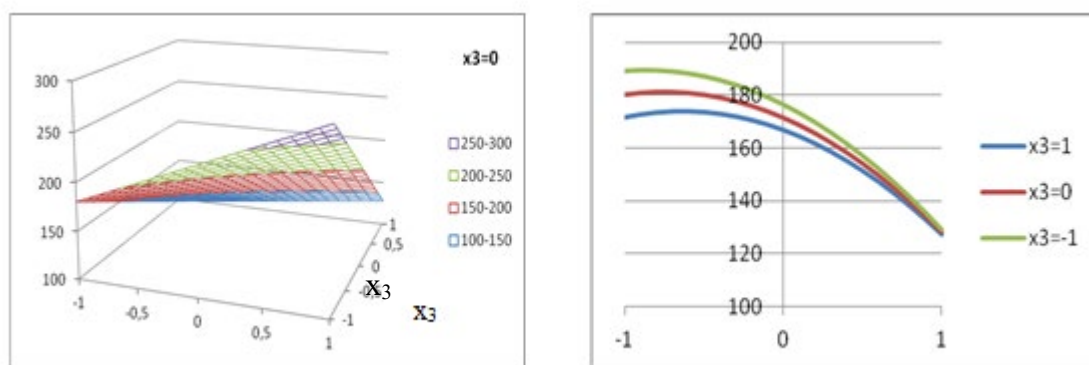


Рисунок 9. График зависимости поперечного перемещения почвенной массы от параметров комбинированного корпуса плуга

Figure 9. Graph of the dependence of the transverse movement of the soil on the parameters of the combined plow body

Определим оптимальные параметры комбинированного корпуса плуга, обеспечивающие полный оборот почвенного пласта и его сохранность в виде сплошной ленты. Для этого необходимо обеспечить поворот почвенного пласта на угол неустойчивого равновесия (145°), далее, по достижении данного угла поворота, целостный почвенный пласт полностью оборачивается под действие силы тяжести. При этом для обеспечения целостности (сохранности) почвенного пласта необходимо не допускать его существенных деформаций, приводящих к разрушению пласта на отдельные куски (коэффициент деформации не более 1,62); уменьшить продольное перемещение почвенных частиц для снижения энергоёмкости процесса и увеличить продольное перемещение почвенных частиц для предотвращения осыпания почвы в борозду. Таким образом, необходимо решить следующую оптимизационную задачу:

$$y_1 = 414,4 + 136,2x_1 - 39x_2 + 8,2x_3 - 15,9x_1x_2 - 5,85x_2x_3 \rightarrow \min$$

$$y_2 = 2,15 + 0,52x_1 - 0,21x_2 \rightarrow \min$$

$$y_3 = 158,6 + 16,05x_1 - 4,75x_2 + 1,95x_3 \rightarrow \max$$

$$y_4 = 171,7 + 33x_1 - 59,1x_2 - 4,8x_3 - 17,4x_1x_2 - 2,98x_2x_3 \rightarrow \max$$

$$\text{Ограничения: } -1 \leq x_1 \leq 1, -1 \leq x_2 \leq 1, -1 \leq x_3 \leq 1, y_2 \leq 1,62, y_3 \geq 145$$

Численное решение данной задачи при помощи надстройки «Поиск решения» в Excel: $x_1 = -0,82$; $x_2 = 0,48$; $x_3 = 1$. Используя выражение: $X_i = \frac{x_i - x_{i0}}{I_i}$, где X_i , x_i — соответственно нормализованное и натуральное значения фактора; I_i — интервал варьирования; x_{i0} — натуральное значение основного уровня, найдём оптимальные значения комбинированного корпуса плуга, при которых обеспечиваются полный оборот и сохранность почвенного пласта: угол атаки (α) 36^0 ; угол наклона (β) 15^0 ; угол поворота отвала (θ) 20^0 .

4. Заключение

Проведено экспериментальное исследование комбинированного корпуса плуга для лесных площадей, который может входить в конструкции многофункциональных (комбинированных) орудий, разрабатываемых в рамках рациональной ресурсосберегающей технологии лесовосстановительных работ, исключаяющей корчёвку пней.

Получены регрессионные модели влияния технологических параметров орудия, таких как угол атаки, угол наклона дискового корпуса и угол поворота отвала на качественные показатели его работы (оборот и сохранность почвенного пласта). Установлено, что наибольшее влияние на вышеназванные характеристики работы орудия оказывает угол атаки, менее значимое — угол наклона дискового корпуса, третьестепенное — угол поворота отвала. При этом угол атаки и угол наклона дискового корпуса оказывают противоречивое влияние на процесс обработки. Так, увеличение угла атаки и снижение угла наклона дискового корпуса, с одной стороны, повышают оборот почвенного пласта, с другой — снижают его сохранность.

Определены оптимальные параметры комбинированного корпуса плуга [угол атаки (α) 36^0 ; угол наклона (β) 15^0 ; угол поворота отвала (θ) 20^0], обеспечивающие полный оборот почвенного пласта и его сохранность в виде сплошной ленты. Для этого необходимо обеспечить поворот почвенного пласта на угол неустойчивого равновесия (145^0), далее по достижении данного угла поворота целостный почвенный пласт полностью оборачивается под действие силы тяжести. При этом для обеспечения целостности (сохранности) почвенного пласта необходимо не допускать его существенных деформаций, приводящих к разрушению пласта на отдельные куски (коэффициент деформации не более 1,62).

Список литературы

1. Зимарин С. В. Дисковый корпус плуга с гиперболоидным отвалом // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 2-1 (13-1). С. 47—49. DOI: 10.15393/j2.art.2016.3201.
2. Лягоскин М. А., Алиев Н. В., Дручинин Д. Ю. Особенности выполнения основной обработки почвы на вырубках // Молодой учёный. 2017. № 14 (148). С. 92—96.

3. Modeling of double action disc harrow draft force based on tillage depth and forward speed / I. Ranjbar, M. Rashidi, H. F. Lehmalı [et al.] // Middle east journal of scientific research. 2013. Vol. 17, no. 8. P. 1061—1067.
4. Karmakar S., Kushwaha R. L. Simulation of soil deformation around a tillage tool using computational fluid dynamics // Transactions of the ASAE. 2005. Vol. 48, no. 3. P. 923—932.
5. Modeling the effect of weight and forward speed on the performance of disc plough / O. M. Olatunji, A. J. Akor, B. A. Ozogu [et al.] // Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry. 2009. Vol. 8, no. 2. P. 130—149. Text. Image: electronic.
6. Sharifat K. Modeling soil movement by tillage tools // Canadian Biosystems Engineering. 2000. Vol. 42, no. 4. P. 165—172.
7. Патент на изобретение 2727834 С1, 24.07.2020 / С. В. Зимарин, М. В. Драпалюк, М. С. Хрипченко, И. В. Четверикова. Заявл. № 2019144354 от 24.12.2019.
8. Нартов П. С. Дисковые почвообрабатывающие орудия. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1972. 181 с.
9. Chaudhary A. Testing of tillage implements: disc plough, mouldboard plough and disc harrow. 2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.25608.67840.
10. Evaluating the success of direct seeding for tropical forest restoration over ten years / M. G. Freitas [et al.] // Forest Ecology and Management. 2019. No. 438. P. 224—232. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.02.024.
11. Зимарин С. В., Четверикова И. В. К обоснованию параметров корпуса дискатора для нераскорчёванных вырубков // Resources and Technology. 2020. Т. 17, № 3. С. 97—110. DOI: 10.15393/j2.art.2020.5382.
12. Зимарин С. В., Хрипченко М. С., Четверикова И. В. Исследование параметров новой конструкции мультиблока для ресурсосберегающего восстановления дубрав // Resources and Technology. 2022. Т. 19, № 2. С. 118—133. DOI: 10.15393/j2.art.2022.6263.
13. Анализ дисковых рабочих органов лесных почвообрабатывающих орудий / С. В. Малюков, М. Н. Лысыч, Л. Д. Бухтояров [и др.] // Лесотехнический журнал. 2023. Т. 13, № 2 (50). С. 128—141.
14. Soil-cutting simulation and parameter optimization of rotary blade's three-axis resistances by response surface method / G. Zhang, Z. Zhang, M. Xiao [et al.] // Computers and Electronics in Agriculture. 2019. P. 164.
15. Laboratory studies of extinguishing a forest ground fire with soil / M. A. Gnusov, M. V. Drapalyuk, D. Yu. Druchinin [et al.] // AIP Conference Proceedings. Series 2: Proceedings of the II International Conference on Advances in Materials, Systems and Technologies, CAMSTech-II 2021. 2022. P. 030031.
16. Effect of soil preparation method on economic result of Norway spruce regeneration chain / K. Uotila K. [et al.] // Silva Fenn. 2010. Vol. 44, no. 3. P. 511—524.

References

1. Zimarin S. V. The disc plough body with a hyperboloidal dump. *Relevant directions of scientific research of the 21st century: theory and practice*, 2015, vol. 3, no. 2-1 (13-1), pp. 47—49. doi: 10.15393/j2.art.2016.3201. (In Russ.)
2. Lyagoskin M. A., Aliev N. V., Druchinin D. U. Particularities of basic soil cultivation on cutting-down. *Young scientist*, 2017, no. 14 (148), pp. 92—96. (In Russ.)
3. Ranjbar I., Rashidi M., Lehmalı H. F., Mirmoradi M., Abdolalizadeh E. Modeling of double action disc harrow draft force based on tillage depth and forward speed. *Middle east journal of scientific research*, 2013, vol. 17, no. 8, pp. 1061—1067.

4. Karmakar S., Kushwaha R. L. Simulation of soil deformation around a tillage tool using computational fluid dynamics. *Transactions of the ASAE*, 2005, vol. 48, no. 3, pp. 923—932.
5. Olatunji O. M., Akor A. J., Ozogu B. A., Burubai W., Davies R. M. Modeling the effect of weight and forward speed on the performance of disc plough. *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry*, 2009, vol. 8, no. 2, pp. 130—149. Text. Image: electronic.
6. Sharifat K. Modeling soil movement by tillage tools. *Canadian Biosystems Engineering*, 2000, vol. 42, no. 4, pp. 165—172.
7. Zimarin S. V., Drapalyuk M. V., Hrypchenko M. S., Chetverikova I. V. Patent of invention 2727834 Urgent1, 24.07.2020. Request apostille 2019144354 from 24.12.2019. (In Russ.)
8. Nartov P. S. Disk tillage tools. Voronezh, VSU Publishing House, 1972. 181 p. (In Russ.)
9. Chaudhary A. *Testing of tillage implements: disc plough, mouldboard plough and disc harrow*, 2019. doi: 10.13140/RG.2.2.25608.67840.
10. Freitas M. G. [et al.]. Evaluating the success of direct seeding for tropical forest restoration over ten years. *Forest Ecology and Management*, 2019, no. 438, pp. 224—232. doi: 10.1016/j.foreco.2019.02.024.
11. Zimarin S. V., Chetverikova I. V. To substantiate the parameters of the discator housing for uncorrected cuttings. *Resources and Technology*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 97—110. doi: 10.15393/j2.art.2020.5382. (In Russ.)
12. Zimarin S. V., Khripchenko M. S., Chetverikova I. V. Investigation of parameters of a new multiblock design for resource-saving restoration of oak forests. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 118—133. doi: 10.15393/j2.art.2022.6263. (In Russ.)
13. Malyukov S. V., Lysych M. N., Bukhtoyarov L. D., Pozdnyakov E. V., Gnusov M. A., Shavkov M. V., Petkov A. F. Analysis of disk working bodies of forest tillage tools. *Forestry Journal*, 2023, vol. 13, no. 2 (50), pp. 128—141. (In Russ.)
14. Zhang G., Zhang Z., Xiao M., Bartos P., Bohata A. Soil-cutting simulation and parameter optimization of rotary blade's three-axis resistances by response surface method. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, p. 164.
15. Gnusov M. A., Drapalyuk M. V., Druchinin D. Yu., Zimarin S. V. Laboratory studies of extinguishing a forest ground fire with soil. *AIP Conference Proceedings. Series 2: Proceedings of the II International Conference on Advances in Materials, Systems and Technologies, CAMSTech-II 2021*, 2022, p. 030031.
16. Uotila K. [et al.]. Effect of soil preparation method on economic result of Norway spruce regeneration chain. *Silva Fenn.*, 2010, vol. 44, no. 3, pp. 511—524.

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7783

УДК 621.357.74

Статья

Повышение износостойкости муфты сцепления композиционным гальваническим хромированием

Жачкин Сергей Юрьевич

доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I (Российская Федерация), zhach@list.ru

Козлов Вячеслав Геннадьевич

доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I (Российская Федерация), vyu-kozlov@yandex.ru

Трифонов Григорий Игоревич

кандидат технических наук, старший научный сотрудник ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (Российская Федерация), grishakip@yandex.ru

Сидоркин Олег Анатольевич

кандидат технических наук, доцент, ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (Российская Федерация), trifonov_gi@mail.ru

Получена: 7 марта 2024 / Принята: 4 июня 2024 / Опубликовано: 11 июня 2024

Аннотация: В настоящее время развиваются технологии и инновации, которые направлены на восстановление и упрочнение рабочих поверхностей деталей машин, в особенности при рассмотрении специального оборудования агропромышленного комплекса, поэтому большой интерес вызывают технологии получения качественных хромовых износостойких композиционных покрытий. Их многокомпонентная структура лежит в основе улучшения работоспособности восстанавливаемых деталей сельскохозяйственных машин. Данная научная работа посвящена исследованию износостойкости образцов с нанесёнными покрытиями гальваническим хромированием. Так, представлены результаты экспериментов, которые дали основу для уточнения механизма износостойкости сталей с хромовым покрытием, полученные стандартным гальваническим методом, а также методом нанесения композиционных покрытий. Проводимые экспериментальные исследования выполнялись на образцах из стали 30ХГСА ТУ 14-1-950-74 в форме цилиндра, которые учитывают эксплуатационные

особенности специального тракторного оборудования и условия его работы. Размер цилиндрических образцов из стали 30ХГСА: диаметр 25 мм, длина 150 мм. Для осаждения покрытий применялся электролит: 200—250 г/л CrO_3 и 2,0—2,5 г/л H_2SO_4 . При этом использовалась экспериментальная установка, разработанная коллективом авторов, которая полностью соответствует требованиям по формированию функциональных покрытий на поверхностях деталей сельскохозяйственной техники и специального оборудования. После проведения операций по нанесению хромовых покрытий были детально проанализированы их критерии качества ввиду высокой вероятности образования избыточных остаточных напряжений. На данных образцах проводился весь цикл предварительной подготовки для нанесения покрытий. Проведены испытания и представлены полученные сводные результаты по их относительной износостойкости. Кроме того, получены данные по интенсивности износа исследуемых образцов при различных нагрузках на узел трения. Исследования показали, что существующие утверждения о преимуществах композиционных покрытий подтверждаются, поскольку количественная характеристика износа в образцах менялась в пользу увеличения износостойкости при применении метода нанесения композиционных покрытий. При этом виды износа образцов со стандартными гальваническими и хромовыми композиционными покрытиями оказались сходными с серийными парами трения.

Ключевые слова: хромирование; композиционное покрытие; износ; износостойкость; плотность тока; электролит

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7783

Article

Clutch wear resistance enhancement by composite galvanic chrome plating

Sergey Zhachkin

*D. Sc. in engineering, professor, Voronezh State Agrarian University
named after Emperor Peter I (Russian Federation), zhach@list.ru*

Vyacheslav Kozlov

*D. Sc. in engineering, professor, Voronezh State Agrarian University
named after Emperor Peter I (Russian Federation), vya-kozlov@yandex.ru*

Grigory Trifonov

*Ph. D. in engineering, senior researcher, Military educational scientific center
Air force «Air force academy named after professor N. E. Zhukovsky
and Yu. A. Gagarin» (Russian Federation), grishakip@yandex.ru*

Oleg Sidorkin

*Ph. D. in engineering, associate professor, Military educational
scientific center Air force «Air force academy named after professor N. E. Zhukovsky
and Yu. A. Gagarin» (Russian Federation), trifonov_gi@mail.ru*

Received: 7 March 2024 / Accepted: 4 June 2024 / Published: 11 June 2024

Abstract: At a time of developing technologies and innovations aimed at restoring and strengthening the working surfaces of machine parts, especially considering special equipment of the agro-industrial complex, technologies for obtaining high-quality chrome wear-resistant composite coatings are of great interest. Their multicomponent structure underlies operability improvement of the restored parts of agricultural machinery. This work presents the study of the wear resistance of samples with electroplated chrome plating coatings. The experimental results provided the basis for clarifying the mechanism of wear resistance of chrome-coated steels obtained by the standard electroplating method, as well as by the method of applying composite coatings. The experimental studies were performed on samples made of steel 30KHGSA TU 14-1-950-74 in the form of a cylinder, which take into account the operational characteristics of special tractor equipment and its working conditions. The size of cylindrical samples made of 30HGSA steel were the following: diameter 25 mm, length 150 mm. The authors used the electrolyte 200—250 g/l CrO₃ and 2.0—2.5 g/l H₂SO₄

for deposition of coatings. An experimental installation was developed by a team of authors, which met the requirements for functional coatings formation on the surfaces of agricultural machinery parts and special equipment. The chrome coating quality criteria were analyzed in detail because of the high probability of excessive residual stresses. The entire cycle of preliminary preparation for coating was performed on these samples. Tests results and summary results on relative wear resistance are presented. In addition, data were obtained on the wear intensity of the studied samples under various loads on the friction unit. The conducted studies have shown that the existing claims about the advantages of composite coatings are confirmed, since the quantitative characteristics of samples wear demonstrated wear resistance increase when using the composite coating method. The type of samples wear with standard galvanic and chrome composite coatings turned out to be similar to that of serial friction pairs.

Keywords: chrome plating; composite coating; wear; wear resistance; current density; electrolyte

1. Введение

История современных тракторов неразрывно связана с проблемой их интенсивного износа. Учитывая то, что преимущественно тракторная техника используется в сельском хозяйстве и строительной отрасли, непрерывный процесс износа является неотъемлемым аспектом её жизненного цикла. Представляя собой сложную техническую систему, тракторы подвержены различным видам износа. Один из наиболее распространённых видов износа — это механический износ, вызванный трением между движущимися деталями. Это может происходить в результате неправильной эксплуатации машины, несоответствия смазочных материалов и деталей, а также нарушения режима работы. Кроме того, износ может быть вызван абразивными материалами, с которыми тракторы взаимодействуют во время работы. Песок, глина, гравий и другие вещества, находящиеся на поле или строительной площадке, могут наносить повреждения металлическим деталям тракторов, вызывая износ последних. Это требует постоянного внимания со стороны операторов и использования защитных покрытий с целью уменьшения износа.

Инновационные технологии восстановления и упрочнения контактирующих поверхностей деталей машин и механизмов, которые эксплуатируются в условиях высокого контактного давления, в контакте с агрессивными средами и веществами, а также при высоких показателях температурных режимов, как правило, основываются на основополагающих способах получения функциональных покрытий.

Опираясь на детальный анализ работ [1—3], можно утверждать, что на современном этапе развития технологий по восстановлению работоспособности детали любого агропромышленного агрегата перспективной (с точки зрения получения качественных износостойких композиционных покрытий и, кроме того, безопасной и экономически выгодной) является технология гальванического хромирования.

Получаемые покрытия при хромировании сталей характеризуются многими параметрами качества [4]. Многокомпонентная структура композитных покрытий улучшает работоспособность рабочих поверхностей восстанавливаемых деталей сельскохозяйственных машин в условиях скольжения и присутствия смазки. Так, один из самых важных эксплуатационных показателей покрытия — износостойкость [5], поскольку ввиду интенсивной работы машин в промышленных масштабах производства их сокращение срока службы обусловлено разрушением поверхностных слоёв рабочих поверхностей. Таким образом, данная научная работа посвящена исследованию износостойкости образцов с нанесёнными покрытиями гальваническим хромированием.

Муфта сцепления пускового двигателя ПД-23, применяемая на бульдозерах Т-130, Т-170 и Б10М, представляет собой важный элемент, обеспечивающий эффективное и плавное соединение между двигателем и сцеплением. Однако в процессе эксплуатации хомута бронзового 17-73-127СП возникает интенсивное изнашивание его рабочих поверхностей, что за время его активной работы приводит к снижению эксплуатационных характеристик.

Стоит отметить, что в условиях трения, возникающего при возвратно-вращательных движениях, перенос материала и структурные изменения отсутствуют.

При детальном изучении вопроса, касающегося особенностей эксплуатации хомута бронзового 17-73-127СП, был сделан вывод, что на величину его эксплуатационного ресурса прямое влияние оказывают динамические воздействия абразивных частиц в ходе его работы, особенно в случаях отсутствия упрочняющего покрытия. Известно [6], [7], что при трении хромового покрытия с другим материалом (металлическим сплавом), из которого изготовлена деталь трения, износ происходит преимущественно на детали с более низкой твёрдостью. Причём, согласно работам [8], [9] и прикладным исследованиям [10], [11], было определено, что хромовое покрытие на восстановленных деталях машин не имеет следов от соударения с абразивными частицами и прочих повреждений и царапин, а степень износа минимальна.

2. Материалы и методы

Цель исследований — в лабораторных условиях провести ряд экспериментов, направленных на уточнение механизма износостойкости сталей с хромовым покрытием, которое получено стандартным гальваническим методом и методом нанесения композиционных покрытий.

Для проведения исследований и выполнения поставленной в работе цели были подготовлены образцы из стали 30ХГСА ТУ 14-1-950-74 в форме цилиндра, которые учитывают эксплуатационные особенности специального тракторного оборудования и условия его работы. Размер цилиндрических образцов из стали 30ХГСА: диаметр 25 мм, длина 150 мм. Данные образцы подвергались термообработке при напряжении до 1450 МПа, шлифовались, причём шероховатость R_a достигала порядка 1,25 мкм, и затем проводился их отпуск при температуре до 230 °С в течение 120—180 мин, далее — магнитный контроль, обезжиривание, промывка и сушка.

В итоге после проведения вышеописанных действий проводилось осаждение хромовых покрытий. Состав используемого электролита: 200—250 г/л CrO_3 и 2,0—2,5 г/л H_2SO_4 . Выбранный электролит весьма широко используется на машиностроительных и автомобилестроительных предприятиях. Так, согласно известной методике, представленной в работе [12], подготовка электролита проводилась из химически чистых для анализа реактивов. В процессе его изготовления плотность измерялась с помощью ареометра, а кислотность — милливольтметром. При этом температура находилась на необходимом уровне с точностью до 1 К, что подтверждалось с помощью термометра ТПП-11 и параллельно контролировалось термометром ТН-5.

После проведения операций по нанесению хромовых покрытий на поверхности образцов были детально проанализированы их критерии качества, причём необходимо учесть, что образцы не подвергались предварительной и последующей механической обработке ввиду высокой вероятности образования остаточных напряжений [13], что обусловило

получение хромовых покрытий с высокой износостойкостью и предварительно заданными физико-механическими и эксплуатационными параметрами.

В ходе нанесения хромовых покрытий было обусловлено назначение максимальной плотности тока на уровне 350 А/дм^2 , однако в большинстве существующих гальванических цехов, ввиду ограниченности спектра специального оборудования, затруднительно обеспечить плотность тока выше 200 А/дм^2 . При нанесении покрытий величина тока должна быть ограничена на строго заданных пределах, поскольку пропуск токов большой величины приводит к избыточному нагреву поверхностей деталей, следовательно, возникает проблема обеспечения стабильных технологических режимов.

Опираясь на вышепредставленные задачи и аспекты формирования покрытий на поверхностях деталей техники, для нанесения композитных хромовых покрытий была разработана универсальная установка ГКО-1. На фото 1 изображена экспериментальная установка, которая была разработана коллективом авторов с целью обеспечения возможности по нанесению композиционных хромовых покрытий. Данная установка полностью соответствует требованиям по формированию функциональных покрытий на рабочих (изношенных) поверхностях деталей сельскохозяйственной техники и специального оборудования.



Фото 1. Установка ГКО-1 [фото автора]

Photo 1. Installation of GKO-1

В данном исследовании проводились две серии нанесения покрытий.

Серия 1 (стандартное хромирование)

Плотность тока 5 кА/м².

Температура электролита 55 °С.

Серия 2 (композиционные покрытия)

Плотность тока 20 кА/м².

Температура электролита 63 °С.

Давление инструмента 2,0 МПа.

Частота вращения детали 140 об./мин.

Число двойных ходов инструмента 140 дв. х./мин.

С целью создания на финальном этапе в верхнем слое покрытия все экспериментальные образцы серии 1 подвергались пескоструйной обработке (песок ГОСТ 3647-71) при пяти атмосферах давления.

4. Обсуждение и заключение

После проведения технологических операций по нанесению стандартных хромовых покрытий (серия 1) и композиционных покрытий (серия 2) были проведены испытания на их относительную износостойкость. Характеристики покрытий исследуемых образцов (серия 1 и серия 2) представлены в сводной таблице 1.

Таблица 1. Характеристики образцов с хромовыми покрытиями

Table 1. Characteristics of samples with chrome coatings

№ серии	Шероховатость R_a , мкм	Микротвёрдость HV , МПа	Толщина покрытия, мкм	Наличие сетки трещин в покрытии
Серия 1	0,1—0,16	9800—10500	20—40	+
Серия 2	0,04—0,06	10420—11500	20—40	—

На стенде СТО1А были проведены натурные исследования типовой конструкции узла трения, а именно «ось — подшипники скольжения». Исследуя работу подвижных шарнирно-болтовых соединений с различными типами покрытий, авторы использовали специальный стенд. В ходе исследований было обработано по четыре образца в каждой серии испытаний. Результаты сравнительных испытаний показали, что при нагрузке $N = 3,6 \times 10^4$ колебаний вид зависимостей коэффициентов трения для различных нагрузок совпадает. Также было

отмечено сходство износа и несущей способности исследуемых пар. При этом отмечается большая стабильность композиционных покрытий.

Графические результаты исследований представлены на рисунке 1, испытывались образцы при различных нагрузках и частоте колебаний $\nu = 0,5$ Гц. На графике (рисунок 1) введены следующие обозначения: 1, 2, 3 — стандартная технология хромирования; 1*, 2*, 3* — технология нанесения композиционных покрытий. Причём 1,1* — $P = 18,8$ МПа; 2,2* — $P = 42,3$ МПа; 3,3* — $P = 84,3$ МПа. При этом 1, 2, 3 — стандартная технология хромирования; 1*, 2*, 3* — технология нанесения композиционных покрытий.

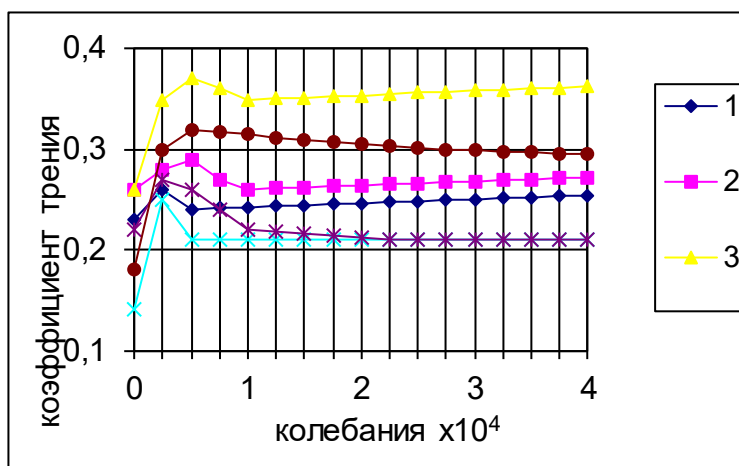


Рисунок 1. Зависимость коэффициента трения от наработки подшипников [рисунок авторов]

Figure 1. Dependence of the coefficient of friction on the operating time of bearings

В таблице 2 представлены полученные данные по интенсивности износа образцов при различных нагрузках на узел трения. Полученные данные были сформированы при показателе в один миллион колебаний.

Таблица 2. Характеристики образцов с хромовыми покрытиями

Table 2. Characteristics of samples with chrome coatings

Нагрузка на узел трения, МПа	Интенсивность износа, мкм/мин		
	Стандартный узел трения	Узел трения с композиционным покрытием	
	пористое	пористое	герметичное
18,8	0,001—0,002	0,0007	0,0011—0,0012
42,3	0,007—0,035	0,0049	0,0058—0,0062

Используя существующую методику проверки износостойкости [12], были проведены аналитические операции по оценке износостойкости покрытий, которые, как показано в данной работе, были получены двумя разными технологиями их нанесения. Было установлено, что технология нанесения композиционных покрытий (серия 2) и её первичная основа (серия 1) обеспечивают получение покрытий, которые в ходе последующей эксплуатации подвергаются повторяющимся циклам изнашивания, причём механизм износа можно представить следующим образом:

- образование плёнки красноватого или бронзового оттенка на поверхности бронзового подшипника (при $P < P_{кр}$) или (при $P > P_{кр}$);
- разрушение плёнки на определённой глубине;
- отшелушивание плёнки, образование глубоких лунок и рисок;
- сглаживание поверхности трения бронзовых подшипников, образование новой плёнки;
- налипание плёнки (бронзы) на хромовые поверхности образца.

Подводя итог проведённым экспериментальным и натурным исследованиям, было выяснено, что с увеличением удельных нагрузок интенсивность износа также растёт. В сравнении с серийными образцами интенсивность износа остаётся практически на исходном уровне. Проведённые исследования показали, что существующие утверждения и научные гипотезы, описывающие особенности и преимущества композиционных покрытий в сравнении со стандартными (легированными), подтверждаются, поскольку, как показали экспериментальные исследования, количественная характеристика износа менялась в пользу увеличения износостойкости при применении метода нанесения композиционных покрытий (серия 2).

Отсюда делаем выводы:

- вид износа и несущая способность образцов со стандартными гальваническими и хромовыми композиционными покрытиями оказались сходными с серийными парами трения;
- с увеличением нагрузок интенсивность изнашивания увеличивается, однако в случае с композиционными покрытиями данный процесс протекает в меньшей степени.

Список литературы

1. *Кравченко И. Н.* Обоснование рационального способа восстановления деталей рабочих органов бетоносмесительных машин: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Балашиха, 2003. 24 с.
2. *Блюментейн В. Ю., Малахов М. С.* Способы восстановления деталей и процессы реновации машин. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, 2016. 139 с. ISBN 978-5-906888-23-5.
3. *Коломейченко А. В.* Технологии повышения долговечности деталей машин восстановлением и упрочнением рабочих поверхностей комбинированными методами

- с применением микродугового оксидирования. Орёл: Орловский государственный аграрный университет им. Н. В. Парахина, 2012. 255 с.
4. Жетесова Г. С., Жаркевич О. М., Нуржанова О. А. Оценка показателей качества газотермических покрытий // *Технология машиностроения*. 2017. № 10. С. 27—30.
 5. Якунина Ю. Ю. Обзор технологии повышения износостойкости покрытий при восстановлении деталей // *Высшая школа*. 2016. № 21-1. С. 78—79.
 6. Обзор и анализ разработок и исследований трибологических характеристик покрытий Ni—P как альтернатива хромовым покрытиям / Е. Г. Винокуров, Т. Ф. Бурухина, В. Д. Скопинцев [и др.] // *Гальванотехника и обработка поверхности*. 2023. Т. 31, № 1. С. 19—35. DOI: 10.47188/0869-5326_2023_31_1_19.
 7. Жачкин С. Ю. Восстановление деталей плунжерных пар дисперсно-упрочнённым хромовым покрытием // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2006. № 10. С. 10.
 8. Жачкин С. Ю. Восстановление деталей сельхозмашин методом холодного нанесения гальванических композитных хромовых покрытий: специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве»: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2005. 45 с.
 9. Жачкин С. Ю. Восстановление деталей сельхозмашин методом холодного нанесения гальванических композитных хромовых покрытий: специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве»: Дис. ... д-ра техн. наук. М., 2005. 367 с.
 10. Глянцев Н. И., Стекольников Н. М., Котов В. В. Шероховатость хромовых покрытий // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2005. Т. 5, № 6. С. 828—833.
 11. Битюцкая Л. А., Соколов Ю. В., Спиридонов Б. А. Особенности электрокристаллизации хромовых покрытий // *Технология машиностроения*. 2011. № 6. С. 17—19.
 12. Гаркунов Д. Н., Старосельский А. А. Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение, 1967. 126 с.
 13. Гринченко М. И. Метод определения механических остаточных напряжений и его перспективы для создания эталона единицы механического остаточного напряжения // *Вестник метролога*. 2016. № 4. С. 19—23.

References

1. Kravchenko I. N. *Substantiation of a rational way to restore the details of the working bodies of concrete mixing machines: Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences*. Balashikha, 2003. 24 p. (In Russ.)
2. Blumenstein V. Yu., Malakhov M. S. *Methods of restoration of parts and processes of renovation of machines*. Kemerovo: Kuzbass State Technical University named after T. F. Gorbachev, 2016. 139 p. ISBN 978-5-906888-23-5. (In Russ.)
3. Kolomeichenko A. V. *Technologies for increasing the durability of machine parts by restoring and strengthening working surfaces by combined methods using microarc oxidation*. Orel: Oryol State Agrarian University named after N. V. Parakhin, 2012. 255 p. (In Russ.)
4. Zhetesova G. S., Zharkevich O. M., Nurzhanova O. A. Assessment of the quality indicators of gas thermal coatings. *Mechanical engineering technology*, 2017, no. 10, pp. 27—30. (In Russ.)
5. Yakunina Yu. Y. Review of technology for increasing the wear resistance of coatings during the restoration of parts. *High school*, 2016, no. 21-1, pp. 78—79. (In Russ.)
6. Vinokurov E. G., Burukhina T. F., Skopintsev V. D., Vasil'ev V. V., Grafushin R. V. Review and analysis of the development and research of tribological characteristics of Ni—P coatings

- as an alternative to chrome coatings. *Electroplating and surface treatment*, 2023, vol. 31, no. 1, pp. 19—35. doi: 10.47188/0869-5326_2023_31_1_19. (In Russ.)
7. Zhachkin S. Yu. Restoration of parts of plunger pairs with a dispersed-hardened chrome coating. *Repair. Recovery. Modernization*, 2006, no. 10, p. 10. (In Russ.)
 8. Zhachkin S. Y. *Restoration of agricultural machinery parts by cold application of electroplated composite chrome coatings: specialty 05.20.03 «Technologies and maintenance tools in agriculture»: Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences*. Moscow, 2005. 45 p. (In Russ.)
 9. Zhachkin S. Yu. *Restoration of agricultural machinery parts by cold application of electroplated composite chrome coatings: specialty 05.20.03 «Technologies and maintenance tools in agriculture»: dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences*. Moscow, 2005. 367 p. (In Russ.)
 10. Glossev N. I., Stekolnikova N. M., Kotov V. V. Roughness of chrome coatings. *Sorption and chromatographic processes*, 2005, vol. 5, no. 6, pp. 828—833. (In Russ.)
 11. Bityutskaya L. A., Sokolov Yu. V., Spiridonov B. A. Features of electrocrystallization of chrome coatings. *Mechanical engineering technology*, 2011, no. 6, pp. 17—19. (In Russ.)
 12. Garkunov D. N., Staroselsky A. A. *Durability of rubbing machine parts*. Moscow, Mechanical engineering, 1967. 126 p. (In Russ.)
 13. Grinchenko M. I. Method for determining mechanical residual stresses and its prospects for creating a standard unit of mechanical residual stress. *Bulletin of the metrologist*, 2016, no. 4, pp. 19—23. (In Russ.)

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7823

УДК 625.042

Статья

Анализ факторов, влияющих на несущую способность автомобильной дороги с покрытием капитального типа

Мохирев Александр Петрович

*доктор технических наук, доцент, Сибирский федеральный университет
(Российская Федерация), ale-mokhirev@yandex.ru*

Серватинский Вадим Вячеславович

*кандидат технических наук, доцент, Сибирский федеральный университет
(Российская Федерация), VServatinsky@sfu-kras.ru*

Дудин Павел Олегович

*аспирант, Сибирский федеральный университет (Российская Федерация),
rahadd2@gmail.com*

Сорокина Мария Николаевна

*заведующая лабораторией, Сибирский федеральный университет
(Российская Федерация), msorokina@sfu-kras.ru*

Мохирев Иван Александрович

*студент, Московский государственный технический университет
имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)
(Российская Федерация), mohirevivan@yandex.ru*

Соколова Анжела Романовна

*студентка, Сибирский федеральный университет (Российская Федерация),
anzhela_sokolova_2003@mail.ru*

Получена: 17 марта 2024 / Принята: 25 июня 2024 / Опубликовано: 27 июня 2024

Аннотация: Несущая способность автомобильной дороги является одним из важнейших показателей для эффективной её эксплуатации. При снижении данного показателя значительно снижается пропускная способность дороги. Особенно это актуально при сезонной вывозке древесины по лесовозным дорогам. Для сохранения несущей способности автомобильной дороги её следует правильно эксплуатировать, учитывая все негативные факторы. В настоящее

время изучено множество зависимостей и предложены мероприятия по снижению отрицательного воздействия на автодорогу. Однако в сложных автодорожных процессах уже необходимо использовать многофакторное моделирование. Целью настоящего исследования является определение факторов, влияющих на несущую способность автомобильной дороги с покрытием капитального типа, а также их значимость. Для исследования, по результатам литературного анализа, определены 35 факторов. Условно каждый фактор отнесён к одной из групп: природно-климатическая, технологическая, эксплуатационная. Анализ факторов проводился по результатам экспертных оценок. Экспертами являлись инженерно-технические работники автодорожных предприятий, сотрудники Министерства транспорта Красноярского края и представители кафедры автомобильных дорог и городских сооружений Сибирского федерального университета. Всего в оценке участвовало 18 человек. При анализе оценок определены весомости каждого фактора. Наибольшая весомость с суммой 9,2 % у показателей «Влажность грунта» и «Материал дорожной одежды». Также можно выделить факторы с весомостью более 0,04. Количество таких показателей равно 6, именно на них следует воздействовать, в первую очередь, при управлении несущей способностью. Кроме того, были определены 17 из 35 факторов с показателем весомости менее 0,025, их оценки незначительные. При оценке дисперсии и вариации согласованность мнений экспертов определена как удовлетворительная. В целом результаты исследований согласуются с ранее полученными данными, представленными в авторитетных научных изданиях. В дальнейших исследованиях, при проведении лабораторных испытаний необходимо учитывать 6 наиболее значимых факторов: влажность грунта; материал дорожной одежды; температура воздуха и солнечная радиация; величина нагрузки на ось транспортного средства и показатель давления в автомобильных шинах; количество повторений приложения тяжёлой нагрузки и интервал между этими приложениями; плотность слоёв дорожной одежды и земляного полотна.

Ключевые слова: весомость факторов; экспертная оценка; несущая способность; природно-климатические факторы; технологические факторы; эксплуатационные факторы

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7823

Article

Analysis of factors affecting the bearing capacity of a principal-type paved highway

Aleksander Mokhirev

D. Sc. in engineering, assistant professor, Siberian Federal University (Russian Federation), ale-mokhirev@yandex.ru

Vadim Servatinsky

Ph. D. in engineering, assistant professor, Siberian Federal University (Russian Federation), VServatinsky@sfu-kras.ru

Pavel Dudin

Ph. D. student, Siberian Federal University (Russian Federation), pahadd2@gmail.com

Maria Sorokina

Head of the laboratory Siberian Federal University (Russian Federation), msorokina@sfu-kras.ru

Ivan Mokhirev

Student, Bauman Moscow State Technical University (Russian Federation), mokhirevivan@yandex.ru

Anzhela Sokolova

Student, Siberian Federal University (Russian Federation), anzhela_sokolova_2003@mail.ru

Received: 17 March 2024 / Accepted: 25 June 2024 / Published: 27 June 2024

Abstract: The holding power of a highway is one of the most important indicators for its effective operation. The traffic capacity of the road reduces significantly when this indicator decreases. This is especially true for seasonal highway haul. To preserve the holding power of the highway, it should be properly operated with all negative factors taken into account. Currently, many characteristics have been studied and measures have been proposed to reduce the negative impact on the highway. However, multifactorial modeling should be used in complex road processes. The purpose of this study is to determine the factors affecting the holding power of a principle-type paved highway, as well as their significance. According to

the results of the literary analysis, 35 factors were identified for the study. Tentatively each factor was placed into one of the groups: natural-climatic, technological, and operational. The analysis of the factors was based on the results of expert assessments. The experts were engineering and technical workers of road enterprises, employees of the Ministry of Transport of the Krasnoyarsk Territory and representatives of the Department of Highways and Urban Structures of the Siberian Federal University, Russia. A total of 18 people participated in the assessment. When analyzing the estimates, the weighting of each factor was determined. The indicators «Soil moisture» and «Pavement material» had the greatest weight of 9.2 %. It was also possible to identify factors with a weight of more than 0.04. The number of such indicators was six. These factors should be the first ones to take into account when controlling the highway holding power. Besides, 17 out of 35 factors with a weighting index of less than 0.025 were assumed insignificant. In assessing the variance and variation, the consistency of expert opinions was determined to be satisfactory. In general, the research results are consistent with those previously obtained and presented in reputable scientific publications. For further laboratory tests it is necessary to take into account the six most significant factors: soil moisture, pavement material, air temperature and solar radiation, the magnitude of the load on the axle of the vehicle and the tire pressure indicator, the number of repetitions of heavy load application and the interval between these applications, the density of layers of pavement and roadbed.

Keywords: weighting of factors; expert assessment; holding power; natural and climatic factors; technological factors; operational factors

1. Введение

От несущей способности дороги зависит её пропускная способность, а значит, эффективность транспортной системы внутри региона или между регионами. Деформации различного типа значительно снижают несущую способность. Стоит уточнить, что могут быть деформации земляного полотна, дорожной одежды или других элементов автомобильной дороги [1], [2]. В большей степени разрушения происходят на лесотранспортных дорогах, при этом значительно снижается работоспособность и пропускная способность лесотранспортного пути.

Разрушения могут быть вызваны низким качеством выполнения работ, недостаточным или неправильным учётом гидрогеологических условий, применением материалов низкого качества или неправильной эксплуатацией автомобильной дороги. Большое значение в обеспечении устойчивости дорожной одежды имеет своевременный ремонт разрушенных участков дорожного покрытия. Появление остаточных (необратимых) деформаций, своевременно не ликвидированных, приводит к значительным разрушениям, как под действием движения автомобилей, так и под влиянием природно-климатических факторов. Для снижения значения природно-климатических условий на несущую способность дороги в регионах России предусмотрен запрет движения большегрузных автотранспортных средств с целью сохранности трасс в период половодья и распутицы. Вопрос вида транспорта, сроков запрета и на каких дорогах решается в каждом регионе самостоятельно. Заранее, обычно за несколько недель или месяц, власти субъекта выпускают соответствующий документ, которым вводят сезонные ограничения, устанавливают сроки его действия, определяют допустимые осевые нагрузки или допустимую общую массу для беспрепятственного проезда транспортных средств в это время и утверждают перевозки-исключения, которых данные меры не касаются. При этом время запрета снижает пропускную способность автодорог, что влияет на экономику региона. Подробное изучение факторов, влияющих на несущую способность автомобильной дороги, позволит обосновать и определить общие и локальные мероприятия, а также их местоположения, направленные на снижение их влияния.

Проблемой увеличения несущей способности автомобильных дорог и снижения значимости на неё негативных факторов занимались и занимаются многие учёные и производственные работники автодорожной сферы в России и за рубежом. Так, например, в работе С. А. Качанова, Г. М. Нигметова исследуются факторы, влияющие на потерю несущей способности грунтового полотна из-за геологических опасностей (суффозии, карсты, землетрясения, разжижение грунтов), которые могут привести к катастрофам массового характера. Геологические опасности могут возникнуть как вторичные из-за техногенных причин, например, аварий на коммунально-энергетических сетях. Кроме того, могут быть аварии, связанные с потерей устойчивости конструктивных систем мостов, туннелей, эстакад. Потеря устойчивости конструктивных систем может наступить от интенсивного старения материалов конструкций, из-за токсичного воздействия выхлопных газов в сочетании с влиянием вибрации от динамического воздействия

автомобильных колёс [3]. В работе рассматриваются факторы, влияющие на конструктивные системы автомобильных дорог, но они направлены только на результаты, приводящие к катастрофе.

Ряд работ, отражающих разработанные мероприятия по снижению причиняемого вреда автомобильной дороге от перемещения по ней тяжеловесных грузов, опубликованы научными сотрудниками Санкт-Петербургского архитектурно-строительного университета под руководством Р. Р. Сафиуллина [4—6]. Авторами на основе выявленных факторов предлагается методика оптимизации транспортного процесса, учитывающая несущую способность и износ покрытий автомобильных дорог. В исследованиях сделан упор на движение тяжеловесных грузов без учёта природно-климатических условий и сезонного характера местности.

Более глубоко исследованы физико-механические процессы в сезонно-мёрзлых грунтах конструкций автомобильных дорог, которые рассмотрены в работе [7]. Представлены результаты изменения температуры в структуре дороги в зависимости от времени года и осадков с использованием тепловизионной инфракрасной камеры. Установлено, что амплитуда колебаний температуры нелинейно зависит от глубины. Данные исследования возможно применить при определении сезонного использования транспортных средств на различных грунтах в разные периоды года.

Подробный факторный анализ пропускной способности дорог с учётом сезонности их эксплуатации представлен в работе [8]. По результатам исследований выделены наиболее значимые неуправляемые факторы: грунтово-почвенные условия, рельеф местности и наличие водных преград. Однако исследования направлены на эксплуатацию лесовозных дорог и не учитывают подробные факторы, влияющие на несущую способность транспортного пути.

2. Материалы и методы

Целью настоящей работы является определение факторов, влияющих на несущую способность автомобильной дороги с покрытием капитального типа, а также их значимости.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

- По литературному обзору определить показатели, влияющие на несущую способность автомобильной дороги, и разделить их на группы факторов.
- Провести опрос экспертов по оценке значимости каждого фактора на несущую способность дороги.
- Определить весомость каждого фактора.
- Определить разброс мнений экспертов, дисперсию и коэффициент вариации.

Факторный анализ проведён экспертной оценкой [9]. Экспертами в данном исследовании выступили специалисты разного уровня предприятий по строительству, ремонту дорог, управлению движением, Министерства транспорта Красноярского края, а также научные работники кафедры автомобильных дорог и городских сооружений Сибирского

федерального университета. В исследовании принимали участие 18 экспертов. Их задача состояла в оценке факторов, влияющих на эффективность технологической цепочки. Набор факторов определялся путём литературного обзора без предварительной оценки их значимости. Экспертам было предложено оценить значимость 35 факторов, влияющих на несущую способность автомобильной дороги с покрытием капитального типа. Оценки предлагалось поставить от 1 до 10, где 10 — значимость сильная, 1 — значимости нет.

Согласно методике, по результатам оценок экспертов определяются весомость каждого фактора, разброс мнения эксперта, дисперсия, коэффициенты вариации и конкордации (по критериям согласия Пирсона).

3. Результаты

Экспертами проведена оценка факторов. Факторы, сумма баллов всех экспертов, а также весомость представлены в таблице. Условно все факторы можно разделить на три группы: природно-климатические (ПК), технологические (Т), эксплуатационные (Э). Факторы, относящиеся к природно-климатической группе, принято считать неуправляемыми. Однако некоторыми показателями (влажность грунта, температура на поверхности покрытия, температура грунта земляного полотна) можно частично управлять. Например, проводить мероприятия, направленные на снижение влаги грунта, или влиять на температуру поверхности её цветом. Технологические показатели закладываются при строительстве автомобильной дороги, поэтому после запуска дороги также являются не управляемыми. Эксплуатационные факторы являются управляемыми.

По результатам экспертных оценок весомость каждого фактора определялась по формуле

$$B_i = \frac{\sum_{j=1}^m w_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_{ij}}, \quad (1)$$

где B_i — значимость объекта, рассчитанная на основе оценок экспертов; w_{ij} — оценка (в баллах), данная объекту i , экспертом j ; m — число экспертов; n — количество факторов.

Из таблицы видно, что к природно-климатической группе относятся 15 факторов, технологической — 10 факторов, эксплуатационной — 10 факторов. Средняя оценка составила 5,7. Наивысшее значение весомости у влажности грунта 0,0467, со средней оценкой 9,3 балла; 11 экспертов поставили наивысшее значение. Самый низкий балл у данного показателя 7; эту оценку поставили 2 эксперта.

По дисперсии и вариации можно характеризовать разброс мнений экспертов. При вариации менее 0,5 согласованность считается удовлетворительной, при менее 0,3 — хорошей. Из рассчитанных коэффициентов следует, что согласованность удовлетворительная. Низкая согласованность объясняется присутствием экспертов разного уровня и организаций различных дорожных направлений.

Таблица. Результаты экспертной оценки. *Источник:* составлено авторами

Table. Results of the expert assessment. *Source:* compiled by the authors

№	Фактор	Группа	Сумма баллов	Усреднённая оценка	Весомость фактора	Дисперсия	Вариация
1	Влажность грунта	ПК	168	9,3	0,0467	1,059	0,06
2	Влажность окружающего воздуха	ПК	52	2,9	0,0145	3,882	0,65
3	Ветер	ПК	36	2,0	0,0100	2,536	0,57
4	Материал дорожной одежды	Т	162	9,0	0,0451	3,412	0,19
5	Солнечная радиация	ПК	47	2,6	0,0131	2,810	0,49
6	Время после капитального ремонта	Э	138	7,7	0,0384	5,765	0,38
7	Срок службы дороги	Э	132	7,3	0,0367	4,941	0,34
8	Тип земляного полотна (насыпь/выемка)	Т	67	3,7	0,0186	8,000	1,00
9	Величина рабочей отметки: насыпь	Т	76	4,2	0,0211	5,529	0,64
10	выемка	Т	71	3,9	0,0197	8,222	1,00
11	Поперечный уклон дороги	Т	77	4,3	0,0214	7,647	0,88
12	Продольный уклон дороги	Т	86	4,8	0,0239	7,007	0,73
13	Плотность слоёв дорожной одежды и земляного полотна	Т	145	8,1	0,0403	3,350	0,21
14	Равномерность износа (истирания) дорожного покрытия под действием колёс автомобилей	Э	131	7,3	0,0364	4,095	0,28
15	Образование пластических деформаций	Э	141	7,8	0,0392	3,441	0,22
16	Накопление остаточных деформаций и появление структурных разрушений в слоях дорожного покрытия и/или основания	Э	141	7,8	0,0392	3,794	0,24
17	Накопление остаточных деформаций в грунте земляного полотна под действием нагрузки от тяжёлых грузовых автомобилей	Э	142	7,9	0,0395	3,634	0,23
18	Величина нагрузки на ось транспортного средства и показатель	Э	148	8,2	0,0412	3,477	0,21

	давления в автомобильных шинах						
19	Количество повторений приложения тяжёлой нагрузки и интервал между этими приложениями	Э	147	8,2	0,0409	2,971	0,18
20	Продолжительность приложения каждой нагрузки и суммарная продолжительность	Э	132	7,3	0,0367	3,765	0,26
21	Температура воздуха и солнечная радиация	ПК	95	5,3	0,0415	7,271	0,69
22	Состояние системы водоотвода или водопонижения	Э	140	7,8	0,0389	3,948	0,25
23	Тип грунта земляного полотна	Т	124	6,9	0,0345	5,634	0,41
24	Равномерность уплотнения в поперечном направлении слоёв нежёстких дорожных одежд	Т	127	7,1	0,0353	5,938	0,42
25	Равномерность уплотнения в продольном направлении слоёв земляного полотна	Т	127	7,1	0,0353	6,056	0,43
26	Тип местности по характеру увлажнения	ПК	114	6,3	0,0317	5,647	0,45
27	Экспозиция склона	ПК	76	4,2	0,0211	5,359	0,63
28	Тип растительного покрова (лес) на границе полосы отвода	ПК	48	2,7	0,0133	4,212	0,77
29	Высота дороги над уровнем моря	ПК	34	1,9	0,0095	3,046	0,81
30	Температура на поверхности покрытия	ПК	88	4,9	0,0245	4,575	0,47
31	Температура грунта земляного полотна	ПК	84	4,7	0,0234	5,036	0,53
32	Осадки: жидкие	ПК	90	5,0	0,0250	6,644	0,66
33	твёрдые	ПК	54	3,0	0,0150	4,879	0,80
34	количество	ПК	83	4,6	0,0231	8,565	0,91
35	интенсивность	ПК	73	4,1	0,0203	7,912	0,95
	Итого		3596	199,8	1,0000		

Проранжированные в порядке убывания факторы представлены на диаграмме (рисунок 1).

Из анализа факторов видно, что наибольшая весомость у показателей «Влажность грунта» и «Материал дорожной одежды». В сумме они составляют 9,2 %. Также можно выделить факторы с весомостью более 0,04. Количество таких показателей равно 6. Именно на них

следует воздействовать, в первую очередь, при управлении несущей способностью; 17 из 35 факторов с показателем весомости менее 0,025, оценки их незначительные, их влияние низкое и в дальнейших исследованиях учитываться не должны.

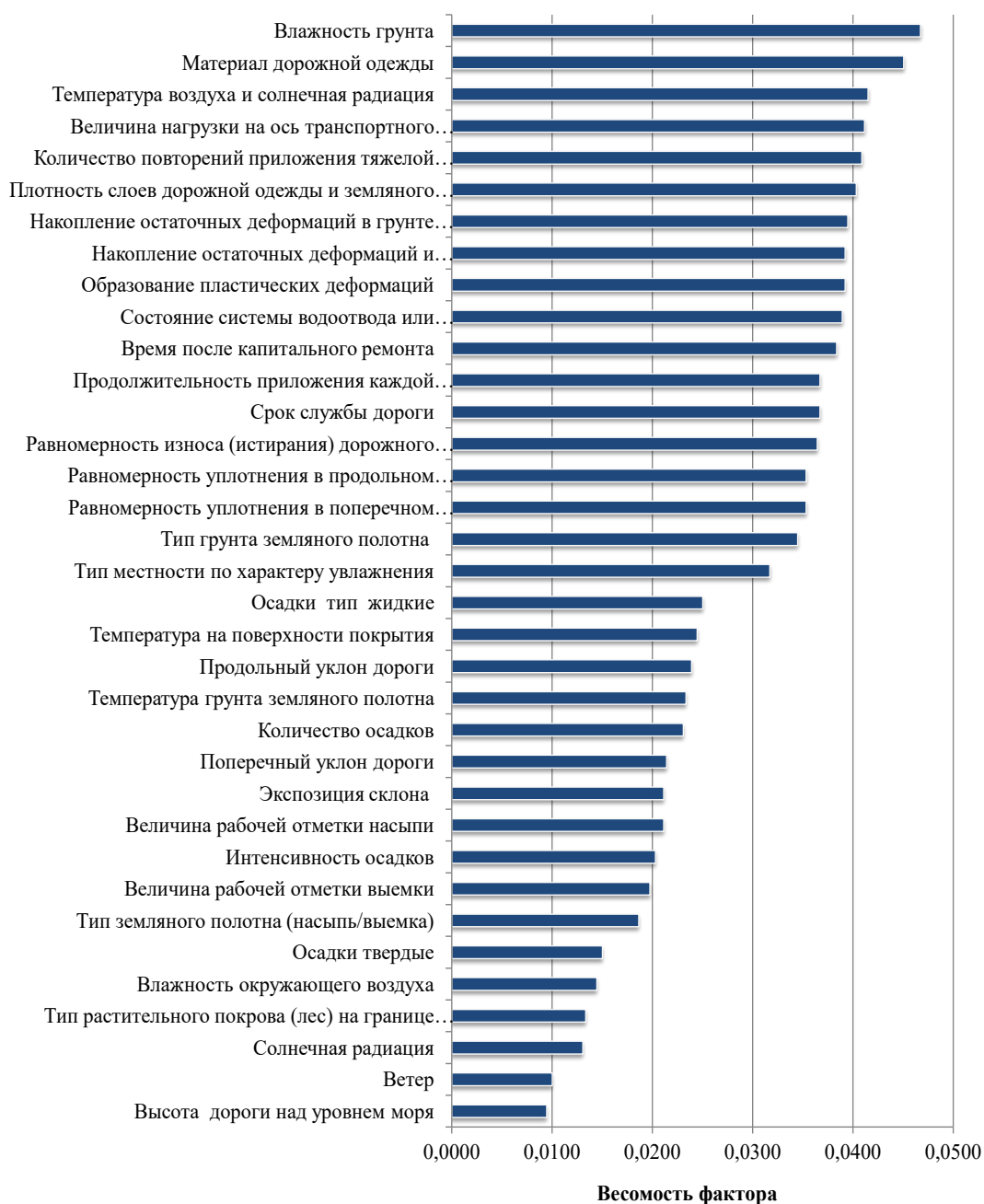


Рисунок 1. Весомость анализируемых факторов [рисунок авторов]

Figure 1. The weight of the analyzed factors

Распределение весомости факторов по группам представлено на диаграммах (рисунок 2).

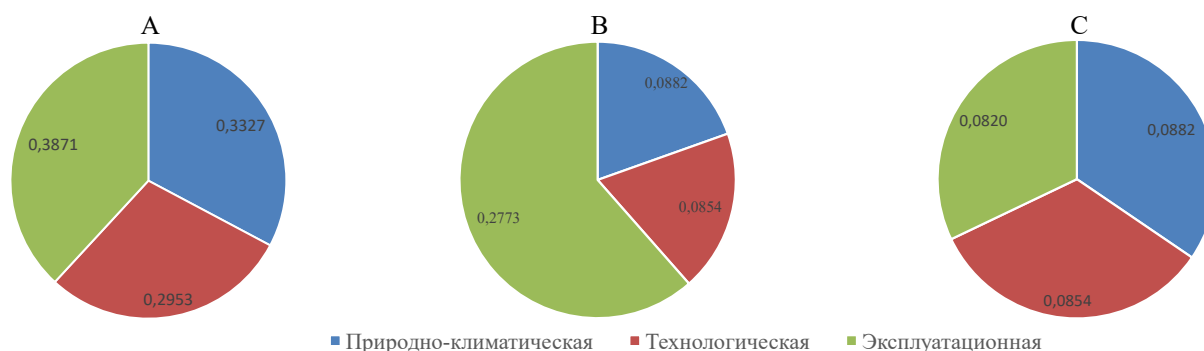


Рисунок 2. Распределение весомости факторов по группам: А — все факторы; В — факторы с весомостью более 0,038; С — факторы с весомостью более 0,040 [рисунок авторов]

Figure 2. Distribution of weighting factors by groups: (A) all factors; (B) factors with a weighting of more than 0.038; (C) factors with a weighting of more than 0.040

По группам факторов распределение весовых коэффициентов примерно одинаковое (рисунок 2А). Однако по наиболее весомым 11 показателям со значениями более 0,038 эксплуатационная группа составила 61 % (рисунок 2В.). По количеству показателей, вошедших в первую шестёрку значений, распределение факторов равномерно, с каждой группы по 2. По сумме их весомости распределение также примерно равномерно (рисунок 2С). По результатам анализа определены наиболее значимые показатели, а также параметры, характеризующие оценку согласованности мнений экспертов как удовлетворительную.

4. Обсуждение

В классической литературе, посвящённой дорожному строительству, главным показателем, влияющим на несущую способность и надёжность автомобильной дороги, определяется влажность используемого грунта [10], [11]. Это заключение полностью согласуется с результатами представленных исследований.

Эксперты незначительно выделяют факторы, характеризующие геометрические характеристики автодороги и место её расположения, что несколько отличается от мнения других исследователей. Однако эти факторы можно расценивать как влияющие на влажность грунта, а значит, не имеющие прямой зависимости.

В целом, результаты исследований согласуются с ранее полученными данными, представленными в авторитетных научных изданиях. Так, в работе авторов W. Xu, X. Huang, Z. Yang, J. Huang [12] анализируются технологические параметры, формируемые при строительстве автомобильной дороги. Методом конечных элементов определяется несущая способность грунта при строительстве автомобильных дорог и выделяются наиболее значимые факторы, на неё влияющие. Как и в настоящих исследованиях, авторами

определены наиболее значимые факторы: строительный материал и плотность слоёв земляного полотна.

Исследователи В. К. Ghalehjough, S. Çelik, S. Akbulut в своей работе [13] представляют результаты влияния характеристик грунта на несущую способность. При этом уделяется внимание типу грунта, доказываемая, что этот параметр оказывает существенное значение на несущую способность земляного полотна. Стоит заметить, что объектом исследований было именно земляное полотно, в нашем же случае рассматривается дорога в целом. Поэтому такой параметр, как тип грунта земляного полотна, по результатам ранжирования на 17-м месте. Однако рассматриваемые характеристики грунта имеют влияние на более значимые факторы.

Авторами А. Sarsembayeva, Р. Е. F. Collins публикации [14] представлены результаты влияния движения влаги в грунте автомобильной дороги на образование дефектов в виде морозного пучения и дальнейшую несущую способность. Исследования проведены методом лабораторного моделирования и доказывают значимость параметров влажности грунта и влияющих на неё характеристик при определении несущей способности дорог капитального типа, что подтверждается результатами, полученными в представленном исследовании. Таким образом, можно отметить, что полученные в настоящем изыскании результаты в целом не противоречат данным, опубликованным ранее в вышеприведённых исследованиях.

5. Заключение

По результатам исследований можно выделить факторы, имеющие наибольшее влияние на несущую способность автомобильной дороги с покрытием капитального типа. При дальнейшем рассмотрении и проведении лабораторных испытаний необходимо учитывать 6 наиболее значимых факторов: влажность грунта; материал дорожной одежды; температура воздуха и солнечная радиация; величина нагрузки на ось транспортного средства и показатель давления в автомобильных шинах; количество повторений приложения тяжёлой нагрузки и интервал между этими приложениями; плотность слоёв дорожной одежды и земляного полотна. При более подробном исследовании можно добавить ещё пять показателей, располагающихся далее по рейтингу: накопление остаточных деформаций в грунте земляного полотна под действием нагрузки от тяжёлых грузовых автомобилей; накопление остаточных деформаций и появление структурных разрушений в слоях дорожного покрытия и/или основания; образование пластических деформаций; состояние системы водоотвода или водопонижения; время после капитального ремонта. Остальные факторы для дальнейших исследований использовать не целесообразно.

Результаты расчёта дисперсии и вариации показывают удовлетворительную согласованность экспертов в оценке факторов.

При управлении сложной системой строительства и эксплуатации автодороги, не снижающей её важные характеристики, следует применять многофакторное

моделирование. При этом увеличение факторов несёт за собой усложнение моделирования и дальнейшее управление системой. Результаты настоящих изысканий позволяют определить факторы, на которые следует воздействовать при дальнейших исследованиях. Рассчитанная весомость значимости влияния факторов позволит построить программу экспериментов, направленных на определение фактических значений несущей способности автомобильной дороги в различных условиях, и дальнейшего моделирования данных процессов. Результаты можно использовать в теоретических и практических исследованиях. Новизной, отличающей представленные изыскания, является обработка большого количества факторов и сравнение их по значимости.

Исследование проводилось при поддержке ООО «Модульные Системы Управления».

Список литературы

1. Enhancing quality of road pavements through adhesion improvement / V. G. Kozlov, A. V. Skrypnikov, S. I. Sushkov [et al.] // Journal of the Balkan Tribological Association. 2019. Vol. 25, no. 3. P. 678—694.
2. Increasing the logging road efficiency by reducing the intensity of rutting: mathematical modeling / A. Y. Manukovsky, I. V. Grigorev, V. A. Ivanov [et al.] // Journal of Mechanical Engineering Research and Developments. 2018. Vol. 41, no. 2. P. 35—41. DOI: 10.26480/jmerd.02.2018.36.42.
3. Качанов С. А., Нугметов Г. М. Диагностика и мониторинг конструктивных систем автомобильных дорог // Технологии гражданской безопасности. 2009. Т. 6, № 1-2 (19-20). С. 82—87.
4. Сафиуллин Р. Р. К вопросу о методике расчёта размера вреда, причиняемого дорожному полотну при транспортировании тяжеловесных грузов автомобильным транспортом в РФ // Известия ТулГУ. Технические науки. 2015. № 5-1. С. 111—117.
5. Сафиуллин Р. Р., Горев А. Э. К вопросу оптимизации планирования перевозочного процесса тяжеловесных грузов автомобильным транспортом // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 5 (70). С. 190—195. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-5-190-195.
6. Safiullin R. N., Reznichenko V. V., Safiullin R. R. The software adaptive system for managing the heavy cargo transportation process based on the automated vehicle weight and size control system // Journal of Physics: Conference Series, Saint Petersburg, 23—24 April, 2020. Saint Petersburg, 2021. P. 012063. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012063.
7. Burgonutdinov A. M., Istomina K. R., Kleveko V. I. Experimental studies of physical and mechanical processes in seasonally frozen soils of constructions of automobile roads // Construction and Geotechnics. 2022. Vol. 13, no. 3. P. 98—106. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.3.09.
8. Мохирев А. П., Медведев С. О., Смолина О. Н. Факторы, влияющие на пропускную способность лесовозных дорог // Лесотехнический журнал. 2019. Т. 9, № 3 (35). С. 103—113. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.3/10.
9. Пузырева О. К., Мохирев А. П. Экспертная оценка факторов, влияющих на качество щепы // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. № 9-2 (20-2). С. 245—249.
10. Алаторцев Д. А., Алексиков С. В. Обоснование расчётных характеристик грунтов земляного полотна // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-

строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2005. № 5. С. 73—79.

11. Каменчуков А. В. Влияние влажности основания дорожной одежды на несущую способность дороги // Транспортные системы Сибири. Развитие транспортной системы как катализатор роста экономики государства: Междунар. научно-практич. конф., Красноярск, 7—8 апреля 2016 года: Сб. науч. тр.: В 2 ч. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2016. Ч. 1. С. 183—187.
12. Structural analysis of the roadbed with backfill on a foundation with a lower bearing capacity using the finite element method / U. Xu, H. Huang, Z. Yang [et al.] // *Achievements of civil engineering*. 2021. P. 1690168. DOI: 10.1155/2021/1690168.
13. Galehdzhou B. K., Chelik S., Akbulut S. Experimental and numerical study of the bearing capacity of granular soil, which is affected by the roundness of particles // *IJGS*. 2017. No. 46 (10), P. 2137—2145.
14. Sarsembayeva A., Collins P. E. F. Assessment of frost resistance and mechanisms of moisture/chemical migration in the soil of highways using the method of laboratory modeling // *Science and Technology of cold regions*. 2017. Vol. 133. P. 26—35. DOI: 10.1016/J.coldregions.2016.10.003.

References

1. Kozlov V. G., Skrypnikov A. V., Sushkov S. I., Kruchinin I. N., Grigorev I. V., Nikiforov A. A., Pilnik Y. N., Teppoev A. V., Lavrov M., Timokhova O. M. Enhancing quality of road pavements through adhesion improvement. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 2019, vol. 25, no. 3, pp. 678—694.
2. Manukovsky A. Y., Grigorev I. V., Ivanov V. A., Gasparyan G. D., Lapshina M. L., Makarova Yu. A., Chetverikova I. V., Yakovlev K. A., Afonichev D. N., Kunitskaya O. A. Increasing the logging road efficiency by reducing the intensity of rutting: mathematical modeling. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 2018, vol. 41, no. 2, pp. 35—41. doi: 10.26480/jmerd.02.2018.36.42.
3. Kachanov S. A., Nigmatov G. M. Diagnostics and monitoring of roads construction systems. *Civil Securiti Technology*, 2009, vol. 6, no. 1-2 (19-20), pp. 82—87. (In Russ.)
4. Safiullin R. R. On the issue of the methodology for calculating the amount of damage caused to the roadway during the transportation of heavy goods by road in the Russian Federation, *Izvestiya TulSU. Technical sciences*, 2015, no. 5 (1), pp. 111—117. (In Russ.)
5. Safiullin R. R., Gorev A. E. On the issue of optimizing the planning of the transportation process of heavy loads by road. *Bulletin of Civil Engineer*, 2018, no. 5 (70), pp. 190—195. doi: 10.23968/1999-5571-2018-15-5-190-195. (In Russ.)
6. Safiullin R. N., Reznichenko V. V., Safiullin R. R. Software-adaptive control system for the process of heavy cargo transportation based on an automated control system for the mass and dimensions of the vehicle. *Journal of Physics: Conference Series, Saint Petersburg, 23—24 April, 2020*. Saint Petersburg, 2021, p. 012063. doi: 10.1088/1742-6596/1753/1/012063.
7. Burgonutdinov A. M., Istomina K. R., Kleveko V. I. Experimental studies of physico-mechanical processes in seasonally frozen soils of road structures. *Construction and geotechnics*, 2022, vol. 13, no. 3, pp. 98—106. doi: 10.15593/2224-9826/2022.3.09.
8. Mokhirev A. P., Medvedev S. O., Smolina O. N. Factors affecting the capacity of logging roads. *Forestry Journal*, 2019, vol. 9, no. 3 (35), pp. 103—113. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2019.3/10. (In Russ.)
9. Puzyreva O. K., Mokhirev A. P. Expert assessment of factors affecting the quality of wood chips. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2015,

- no. 9 (20-2), pp. 245—249. (In Russ.)
10. Alatorcev D. A., Aleksikov S. V. Substantiation of the calculated characteristics of the soil of the roadbed. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*, 2005, no. 5, pp. 73—79. (In Russ.)
 11. Kamenchukov A. V. Influence of the moisture content of the pavement base on the bearing capacity of the road. *Transport systems of Siberia. Development of the transport system as a catalyst for the growth of the state economy: International Scientific and Practical Conference, 7—8 April 2016: Collection of scientific articles: In 2 parts*. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2016, part 1, pp. 183—187. (In Russ.)
 12. Xu U., Huang H., Yang Z., Huang J. Structural analysis of the roadbed with backfill on a foundation with a lower bearing capacity using the finite element method. *Achievements of civil engineering*, 2021, p. 1690168. doi: 10.1155/2021/1690168.
 13. Galehdzhou B. K., Chelik S., Akbulut S. Experimental and numerical study of the bearing capacity of granular soil, which is affected by the roundness of particles. *IJGS*, 2017, no. 46 (10), pp. 2137—2145.
 14. Sarsembayeva A., Collins P. E. F. Assessment of frost resistance and mechanisms of moisture/chemical migration in the soil of highways using the method of laboratory modeling. *Science and Technology of cold regions*, 2017, vol. 133, pp. 26—35. doi: 10.1016/J.coldregions.2016.10.003.

© Мохирев А. П., Серватинский В. В., Дудин П. О., Сорокина М. Н.,
Мохирев И. А., Соколова А. Р., 2024