

№20 (2)

ISSN 2307-0048

Resources and Technology

научный журнал

2023

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Resources and Technology

№20 (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@petsu.ru. Номер телефона: 8 (8142) 76-97-11.

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

Resources and Technology

№20 (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. 20, 2023

Васильев В. В., Афоничев Д. Н.	Обоснование геометрических параметров высокоэффективной плоской сплочной единицы	1 - 19
Зимарин С. В., Четверикова И. В., Щерблякин П., Боровиков Р.	Новое предохранительное устройство для привода лесных почвообрабатывающих машин	20 - 35
Беляев С. В., Левина М. С.	Проблемы и перспективы получения и применения водорода	36 - 54
Абузов А. В., Григорьев И. В., Абузов Я. А., Каляшов В. А., Григорьева О. И.	Методика расчёта экономической эффективности использования аэростатических летательных аппаратов на лесотранспортных операциях	55 - 70
Мохирев А. П., Храмов И. В., Амельчугов С. П., Лях Н. И., Смирнов И. Ю.	Устройство для испытания звукоизоляции древесных панелей	71 - 81
Графова Е. О., Гаврилова О. И., Горбач В. В.	Исследование почвенных субстратов на основе отходов деревообработки для выращивания лесных семян	82 - 98
Тюкавина О. Н., Демина Н. А., Файзулин Д. Х.	Влияние пара в севообороте на качество семян	99 - 112

Content №2, Vol. 20, 2023

<i>Vasiliev V. V., Afonichev D. N.</i>	Calculation of transport and operational indicators of an improved flat-flow unit	1 - 19
<i>Zimarin S., Chetverikova I., Shcheblykin P., Borovikov R.</i>	New safety device for the driving system of forest tillage machines	20 - 35
<i>Belyaev S., Levina M.</i>	Problems and prospects of hydrogen production and usage	36 - 54
<i>Abuzov A., Grigorev I., Abuzov Y., Kalyashov V., Grigoreva O.</i>	Methodology for calculating the economic efficiency of aerostatic aircraft in forest transport operations	55 - 70
<i>Mokhirev A., Khramov I., Amelchugov S., Lyakh N., Smirnov I.</i>	A device for testing the sound insulation of wood panels	71 - 81
<i>Grafova E., Gavrilova O., Gorbach V.</i>	Study of wood waste-based soil substrates for forest seedlings growing	82 - 98
<i>Tyukavina O. N., Demina N. A., Fayzulin D. K.</i>	The effect of fallow in nursery rotation on the quality of seedlings	99 - 112

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6763

УДК 630*378.33

Статья

Обоснование геометрических параметров высокоэффективной плоской плоточной единицы

Васильев Владимир Викторович

*кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (Российская Федерация),
vasiliev.vladimir87@mail.ru*

Афоничев Дмитрий Николаевич

*доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (Российская Федерация),
dmafonichev@yandex.ru*

Получена: 8 февраля 2023 / Принята: 19 апреля 2023 / Опубликовано: 4 мая 2023

Аннотация: Для реализации экономически выгодного первоначального и магистрального сплава лесоматериалов в плоточных единицах требуется разработка современных плоских плоточных единиц, имеющих высокие транспортно-эксплуатационные показатели. Рассмотрена высокоэффективная плоская плоточная единица, обладающая простотой конструкции и высоким коэффициентом полнодревесности. Приведённые преимущества плоской плоточной единицы образуются из-за особенности укладки круглых лесоматериалов в рядах плоточной единицы, когда каждый круглый лесоматериал верхнего ряда укладывается между двумя круглыми лесоматериалами нижнего ряда, а также наличия внутренних и наружных поперечных прокладок. Использование рассмотренной высокоэффективной плоской плоточной единицы, независимо от условий её эксплуатации, требует в обязательном порядке правильного расчёта её габаритных размеров. Предложена методика обоснования геометрических параметров разработанной плоской плоточной единицы, где акцент поставлен на определение проектной и фактической длины, ширины и высоты плоточной единицы. Обоснование геометрических параметров плоской плоточной единицы осуществлялось с учётом конструктивных особенностей плоточной единицы, характера укладки

круглых лесоматериалов в рядах, минимальной ширины и глубины сплавного хода. В результате этого были получены зависимости для расчёта проектной и фактической ширины, длины и высоты высокоэффективной плоской сплottedной единицы. Полученные зависимости для расчёта проектной ширины, длины и высоты плоской сплottedной единицы позволяют определить максимально возможные габаритные размеры сплottedной единицы. В свою очередь, полученные зависимости для расчёта фактической длины, ширины и высоты плоской сплottedной единицы являются рабочими формулами, которые учитывают максимально возможную укладку круглых лесоматериалов в ряду и количество укладываемых рядов и используются при расчёте габаритных размеров изготавливаемой плоской сплottedной единицы для конкретных условий плавания. Применение предложенной высокоэффективной плоской сплottedной единицы на первоначальном и магистральном сплаве лесоматериалов позволит обеспечить экономически выгодную доставку древесины потребителям из труднодоступных мест, где отсутствует развитая сеть автомобильных и железных дорог.

Ключевые слова: плоская сплottedная единица; круглые лесоматериалы; ряды; коэффициент полндревесности; осадка; габаритные размеры

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6763

Article

Calculation of transport and operational indicators of an improved flat-flow unit

Vladimir Vasiliev

Ph. D. in engineering, associate professor, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great» (Russian Federation), vasiliev.vladimir87@mail.ru

Dmitry Afonichev

D. Sc. in engineering, professor, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great» (Russian Federation), dmafonichev@yandex.ru

Received: 8 February 2023 / Accepted: 19 April 2023 / Published: 4 May 2023

Abstract: To implement an economically profitable initial and main timber rafting in raft units, the development of modern flat-raft units with high transport and operational performance is required. A highly efficient flat raft unit with a simple design and a high coefficient of raft section density is considered. The above advantages of a flat raft unit are formed due to the specific design of round timber laying in the rows of a flat unit, when each round timber of the upper row is stacked between two round timbers of the lower row with internal and external transverse gaskets. The use of the considered highly efficient flat-flow unit, regardless of its operating conditions, necessarily requires the correct calculation of its overall dimensions. The method to substantiate geometric parameters of the developed flat raft unit is proposed, where the emphasis is placed on determining the design and actual length, width and height of the raft unit. The geometric parameters of the flat raft unit were justified by taking into account the design features of the raft unit, the design of round timber laying in rows, the minimum width and depth of the floating road. The obtained dependences for calculating the design width, length and height of a flat raft unit allow the authors to determine the maximum possible overall dimensions of a flat unit. In turn, the obtained dependences for calculating the actual length, width and height of a flat raft unit are working formulas that take into account the maximum possible laying of round timber in a row and the number of stacked rows, and are used in calculating the overall dimensions of the manufactured flat raft unit for specific navigation conditions. The use of the proposed highly efficient flat-flow unit for the initial and main timber rafting will make it possible

to ensure cost-effective delivery of wood to consumers from hard-to-reach places that lack a developed network of roads and railways.

Keywords: flat raft unit; round timber; rows; raft section density; draft; overall dimensions

1. Введение

Развитие лесной отрасли Российской Федерации с учётом опыта ведения лесного хозяйства за рубежом [1—9] предусматривает комплекс мероприятий, связанных с посадкой лесных культур, выращиванием лесных культур или лесных насаждений, появившихся в результате естественного возобновления, с заготовкой древесины и её транспортировкой до места потребления [10—15]. Каждое из указанных мероприятий требует разработки новых технологических процессов и технических средств, с помощью которых будет осуществляться реализация ведения рационального лесного хозяйства. При этом следует уделять внимание минимизации потребления материальных и денежных ресурсов на каждом этапе выращивания спелой и высококачественной древесины, при заготовке лесоматериалов и их транспортировке. Основные затраты, как правило, образуются во время заготовки древесины и транспортировки лесоматериалов к потребителю, где затраты на транспортировку лесоматериалов зависят от вида используемого транспорта.

В настоящее время при транспортировке лесоматериалов применяется автомобильный, железнодорожный и водный транспорт [14—24]. Автомобильный транспорт наиболее эффективен при перевозке лесоматериалов на расстояние до 200 км при обязательном наличии или строительстве автомобильных дорог [15], [20—22]. В свою очередь, железнодорожный и водный виды транспорта будут эффективными, когда расстояние транспортировки лесоматериалов превышает 200 км. Использование железнодорожного транспорта требует обязательного строительства или наличия железнодорожных путей, что соответственно предусматривает значительные дополнительные капитальные вложения [15], [25]. Водный транспорт не требует строительства транспортных путей, т. к. используется естественный водный путь в виде существующей сети различных водных объектов [14], [16—17], [23—24]. Таким образом, с экономической точки зрения наиболее рационально применять водный транспорт, когда сети автомобильных и железных дорог отсутствуют или развиты недостаточно для обеспечения полноценной и своевременной поставки лесоматериалов потребителям.

Использование водного транспорта древесины в современных условиях требует [16], [26—30] обязательной эксплуатации малых, средних, крупных и больших рек, которые позволят реализовать всю технологическую цепочку транспортировки лесоматериалов от места заготовки к пункту потребления. Реализацию всей технологической цепочки транспортировки лесоматериалов необходимо выполнять по специально разработанным транспортно-технологическим схемам [31—33], функционирующим на базе плоских сплоточных единиц. Данные транспортно-технологические схемы требуют разработки высокоэффективных плоских сплоточных единиц, характеризующихся следующими показателями: простота конструкции; большая жёсткость; высокий коэффициент полндревесности; машинная реализация процессов изготовления и разборки, спуска на воду и выгрузки из воды. На основании вышесказанного определена цель работы: разработать высокоэффективную конструкцию плоской сплоточной единицы и методику обоснования её геометрических параметров.

2. Материалы и методы

Для полноценной реализации транспортно-технологических схем [31—33], функционирующих на базе плоских сплоточных единиц, разработаны конструкции плоских сплоточных единиц [30], [34], [35], которые могут изготавливаться в сплоточной машине [36] или в грузовой платформе [37]. Каждая конструкция плоской сплоточной единицы имеет свои преимущества и недостатки, влияющие на эффективность выполнения сплава лесоматериалов. Учитывая недостатки известных плоских сплоточных единиц и взяв за прототип сплоточную единицу, выполненную по типу костромской кошмы, осуществили разработку конструкции плоской сплоточной единицы, на которую получен патент РФ № 2777676 [38]. Указанная сплоточная единица была подвергнута дополнительной модернизации, в результате чего получена высокоэффективная плоская сплоточная единица, которая представлена на рисунке 1.

Высокоэффективная плоская сплоточная единица (см. рисунок 1) состоит из рядов круглых лесоматериалов 1, внутренних поперечных прокладок 2 и наружных поперечных прокладок 3. Внутренние поперечные прокладки 2 и наружные поперечные прокладки 3 выполнены в виде круглых лесоматериалов. Поперечные прокладки 2 и 3 уложены в пазы, образованные смещением рядов круглых лесоматериалов 1 относительно друг друга на диаметр наружной поперечной прокладки 3. Ряды круглых лесоматериалов 1 соединены между собой гибкими связями 4. Гибкие связи 4 оснащены соединительными устройствами 5. Каждая поперечная прокладка 2 и 3 соединена с крайними круглыми лесоматериалами ряда с помощью горизонтальных скоб 6. При этом внутренняя поперечная прокладка 2 и наружная поперечная прокладка 3, находящиеся спереди и сзади сплоточной единицы, дополнительно соединены между собой с помощью вертикальных скоб 7.

Высокая эффективность рассмотренной плоской сплоточной единицы заключается в том, что она характеризуется простотой конструкции, высоким коэффициентом полндревесности и изготавливается машинным способом, а следовательно, снижается трудоёмкость изготовления данной сплоточной единицы. При этом изготовление разработанной плоской сплоточной единицы может осуществляться как в сплоточных машинах, так и на грузовой платформе [37], установленной на транспортном средстве, в качестве которого может выступать форвардер, автомобиль, прицепное транспортное средство. Процесс изготовления плоской сплоточной единицы обязательно требует информации о её габаритных размерах для конкретных условий плавания, где правильное обоснование геометрических параметров сплоточной единицы будет являться залогом эффективного выполнения сплавных работ. Особенно это важно при выполнении первоначального сплава лесоматериалов, когда при каждом изменении транспортных условий должен выполняться расчёт максимально допустимой длины, ширины и высоты плоской сплоточной единицы с последующим установлением их фактических значений.

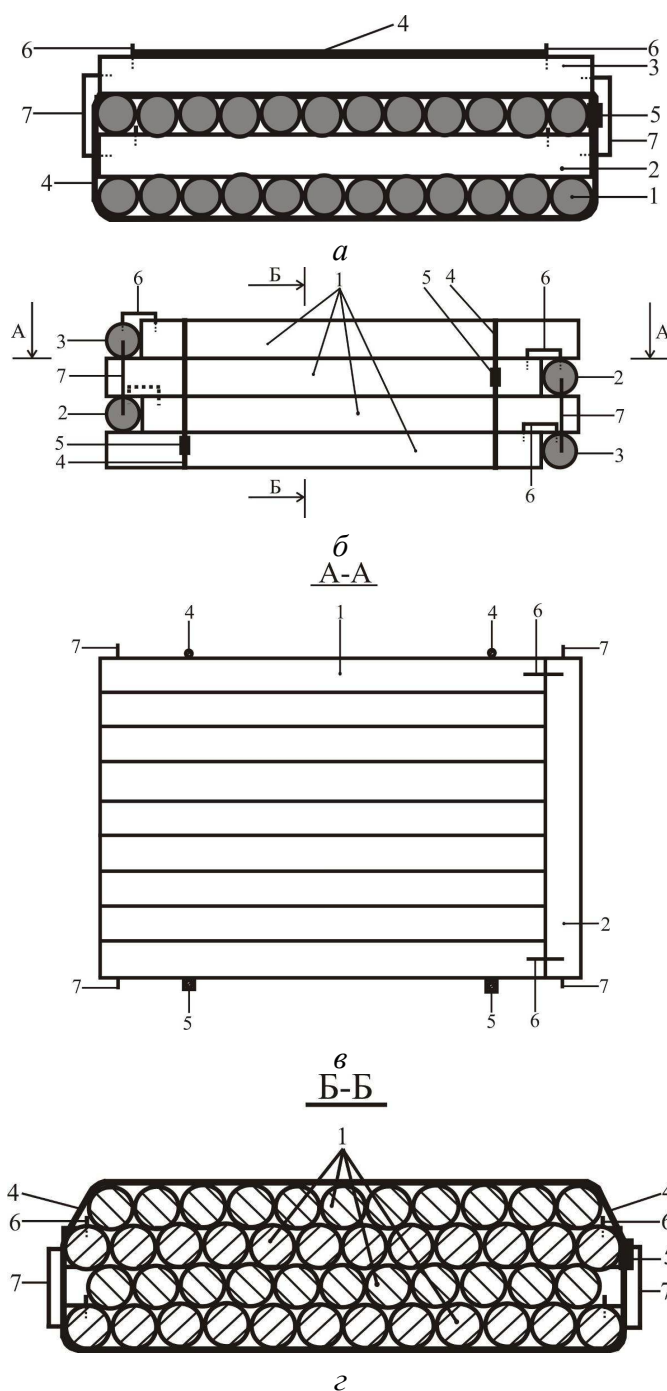


Рисунок 1. Высокоэффективная плоская плоточная единица: *a* — вид спереди; *б* — вид сверху; *в* — разрез А—А; *г* — разрез Б—Б

Figure 1. High-performance flat unit: (a) front view; (b) top view; (c) section A—A; (d) section B—B

Обоснование геометрических параметров высокоэффективной плоской плоточной единицы основывается на теоретическом подходе.

3. Результаты

При использовании высокоэффективной плоской сплottedной единицы на первоначальном сплаве лесоматериалов в первую очередь требуется обоснование её геометрических параметров. К обоснованию геометрических параметров плоской сплottedной единицы относится расчёт её проектной (максимальной) ширины $B_{\text{ппсе}}$, длины $L_{\text{ппсе}}$ и высоты $H_{\text{ппсе}}$ с последующим установлением фактической ширины $B_{\text{фпсе}}$, длины $L_{\text{фпсе}}$ и высоты $H_{\text{фпсе}}$ сплottedной единицы. При этом $B_{\text{ппсе}}$, $L_{\text{ппсе}}$ и $H_{\text{ппсе}}$ плоской сплottedной единицы зависят от габаритов эксплуатируемого водного объекта, т. е. от показателей минимальной ширины $b_{\text{мин.лх}}$ и глубины $h_{\text{мин.лх}}$ сплавного хода на лимитирующем участке водного пути. В свою очередь, $B_{\text{фпсе}}$, $L_{\text{фпсе}}$ и $H_{\text{фпсе}}$ устанавливаются средним диаметром круглых лесоматериалов $d_{1\text{ср}}$, укладываемых в первом (нижнем) ряду, максимально допустимой укладкой круглых лесоматериалов в первом (нижнем) ряду $n_{\text{Гmax}}$ и максимально допустимой укладкой рядов круглых лесоматериалов $n_{\text{Вmax}}$.

Проектная (максимальная) ширина плоской сплottedной единицы $B_{\text{ппсе}}$ зависит от минимальной ширины сплавного хода $b_{\text{мин.лх}}$ и способа транспортировки плоской сплottedной единицы по малым и средним рекам. Если при планировании сплава лесоматериалов предполагается, что транспортировка плоских сплottedных единиц будет осуществляться в составе линейки (плота) за тягой буксировщика, то проектная ширина сплottedной единицы $B_{\text{ппсе}}$ будет равна расчётной ширине линейки (плота) $B_{\text{лп}}$, т. е. $B_{\text{лп}} = B_{\text{ппсе}}$. При указанных обстоятельствах проектная ширина плоской сплottedной единицы $B_{\text{ппсе}}$ будет кратна ширине линейки (плота) $B_{\text{лп}}$, тогда $B_{\text{ппсе}}$ рассчитывается следующим образом:

$$B_{\text{ппсе}} = \frac{B_{\text{лп}}}{n_{\text{ш}}}, \quad (1)$$

где $B_{\text{лп}}$ — ширина линейки (плота), м; $n_{\text{ш}}$ — количество плоских сплottedных единиц, устанавливаемых по ширине линейки (плота), шт.

В случае, когда при планировании сплава лесоматериалов предполагается, что плоские сплottedные единицы будут сплавлиаться самосплавом без тяги буксировщика, то проектная ширина плоской сплottedной единицы равна [30]:

$$B_{\text{ппсе}} = \sqrt{(b_{\text{мин.лх}} - C_{\text{ш}})^2 - L_{\text{ппсе}}^2}, \quad (2)$$

где $b_{\text{мин.лх}}$ — минимальная ширина сплавного хода, м; $C_{\text{ш}}$ — запас для безопасного сплава сплottedных единиц, равный 2—3 м [30]; $L_{\text{ппсе}}$ — проектная длина плоской сплottedной единицы, м.

Фактическая ширина плоской сплottedной единицы устанавливается средним диаметром круглых лесоматериалов $d_{1\text{ср}}$, укладываемых в первом (нижнем) ряду, и максимально

допустимой укладкой круглых лесоматериалов в первом (нижнем) ряду $n_{\Gamma \max}$. На основании сказанного максимально допустимая укладка круглых лесоматериалов в первом (нижнем) ряду составит:

$$n_{\Gamma \max} = \frac{B_{\text{ППСЕ}}}{d_{1\text{CP}}}, \quad (3)$$

где $d_{1\text{CP}}$ — средний диаметр круглых лесоматериалов, укладываемых в первом (нижнем) ряду, м.

Расчётное значение, полученное по формуле (3), округляется до целого числа в меньшую сторону. При этом средний диаметр круглых лесоматериалов необходимо рассчитывать следующим образом:

$$d_{1\text{CP}} = \frac{d_B + d_H}{2}, \quad (4)$$

где d_B — средний диаметр круглых лесоматериалов в верхнем отрезе, м; d_H — средний диаметр круглых лесоматериалов в нижнем отрезе, м.

Фактическая ширина плоской сплоточной единицы определяется по формуле

$$B_{\text{ФПСЕ}} = d_{1\text{CP}} n_{\Gamma \max}. \quad (5)$$

Проектная (максимальная) длина плоской сплоточной единицы $L_{\text{ППСЕ}}$ зависит от длины заготавливаемых круглых лесоматериалов $L_{\text{КЛ}}$ и от среднего диаметра наружной поперечной прокладки $d_{\text{СРНПП}}$ в середине своей длины, тогда $L_{\text{ППСЕ}}$ рассчитывается по формуле

$$L_{\text{ППСЕ}} = L_{\text{КЛ}} + d_{\text{СРНПП}}, \quad (6)$$

где $L_{\text{КЛ}}$ — длина круглых лесоматериалов, укладываемых в рядах плоской сплоточной единицы, м; $d_{\text{СРНПП}}$ — средний диаметр наружной поперечной прокладки, м.

В практических условиях фактическая длина плоской сплоточной единицы также будет определяться $L_{\text{КЛ}}$ и $d_{\text{СРНПП}}$, тогда $L_{\text{ППСЕ}} = L_{\text{ФПСЕ}}$.

Проектная (максимальная) высота плоской сплоточной единицы $H_{\text{ППСЕ}}$ зависит от минимальной глубины сплавного хода $h_{\min \text{ЛХ}}$, тогда

$$H_{\text{ППСЕ}} = \frac{(h_{\min \text{ЛХ}} - Z_D) \rho_B}{\rho_D}, \quad (7)$$

где $h_{\min \text{ЛХ}}$ — минимальная глубина сплавного хода, м; Z_D — донный запас, равный 0,2—0,3 м [30]; ρ_B — плотность воды, кг/м³; ρ_D — плотность древесины круглых лесоматериалов, кг/м³.

При расчёте фактической высоты плоской сплоточной единицы $H_{\text{ФПСЕ}}$ обязательно учитывается особенность укладки круглых лесоматериалов в рядах плоской сплоточной единицы, а именно то, что каждый круглый лесоматериал верхнего ряда укладывается между

двумя круглыми лесоматериалами нижнего ряда. Для дальнейшего расчёта обуславливаемся, что нижний ряд круглых лесоматериалов имеет средний диаметр d_{1Cp} , второй ряд круглых лесоматериалов имеет средний диаметр d_{2Cp} , третий ряд — d_{3Cp} и четвёртый ряд — d_{4Cp} . Тогда на основании схемы, представленной на рисунке 2, расчёт высоты плоской сплочной единицы будет осуществляться с использованием теоремы подобия треугольников и теоремы Пифагора.

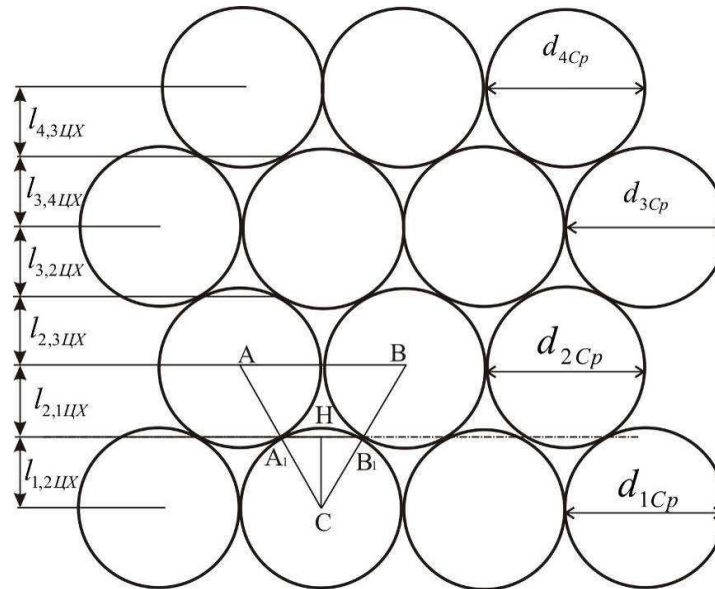


Рисунок 2. Схема для расчёта высоты плоской сплочной единицы

Figure 2. Scheme for calculating the height of a flat flat unit

Из схемы, представленной на рисунке 2, видно, что треугольники ABC и A_1B_1C подобны, откуда прямая AB — это расстояние между центрами круглых лесоматериалов. При этом прямая AB параллельна прямой A_1B_1 , где последняя соединяет точки контакта круглого лесоматериала из первого ряда с двумя круглыми лесоматериалами из второго ряда (см. рисунок 2) и дополнительно является хордой круглого лесоматериала из первого ряда. На основании вышесказанного можно записать следующее равенство:

$$\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{BC}{B_1C}. \quad (8)$$

Так как $AB = d_{2Cp}$, $BC = \frac{d_{1Cp} + d_{2Cp}}{2}$ и $B_1C = \frac{d_{1Cp}}{2}$, то, подставив данные зависимости в равенство (8), выразим хорду A_1B_1 через средние диаметры круглых лесоматериалов, в результате чего получим следующую зависимость:

$$A_1B_1 = l_{\text{хор}} = \frac{d_{1Cp} d_{2Cp}}{d_{1Cp} + d_{2Cp}}. \quad (9)$$

На основании зависимости (9) и теоремы Пифагора расстояние CH от центра круглого лесоматериала, находящегося в первом ряду, до хорды A_1B_1 , которая является прямой, соединяющей точки контакта круглого лесоматериала из первого ряда с двумя круглыми лесоматериалами из второго ряда, будет рассчитываться следующим образом:

$$CH = l_{1,2ЦХ} = \sqrt{\left(\frac{d_{1Cp}}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_{1Cp}d_{2Cp}}{2(d_{1Cp} + d_{2Cp})}\right)^2}. \quad (10)$$

Используя приведённую методику определения расстояния от центра круглого лесоматериала до хорды, получим формулу для расчёта расстояния от центра круглого лесоматериала, находящегося во втором ряду, до прямой (хорды), соединяющей точки контакта круглого лесоматериала из второго ряда с двумя круглыми лесоматериалами из первого ряда:

$$l_{2,1ЦХ} = \sqrt{\left(\frac{d_{2Cp}}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_{1Cp}d_{2Cp}}{2(d_{1Cp} + d_{2Cp})}\right)^2}. \quad (11)$$

Аналогично устанавливается расстояние от центра круглого лесоматериала, находящегося во втором ряду, до прямой (хорды), соединяющей точки контакта круглого лесоматериала из второго ряда с двумя круглыми лесоматериалами из третьего ряда:

$$l_{2,3ЦХ} = \sqrt{\left(\frac{d_{2Cp}}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_{2Cp}d_{3Cp}}{2(d_{2Cp} + d_{3Cp})}\right)^2}. \quad (12)$$

Расстояние от центра круглого лесоматериала, находящегося в третьем ряду, до прямой (хорды), соединяющей точки контакта круглого лесоматериала из третьего ряда с двумя круглыми лесоматериалами из второго ряда:

$$l_{3,2ЦХ} = \sqrt{\left(\frac{d_{3Cp}}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_{2Cp}d_{3Cp}}{2(d_{2Cp} + d_{3Cp})}\right)^2}. \quad (13)$$

Расстояние от центра круглого лесоматериала, находящегося в третьем ряду, до прямой (хорды), соединяющей точки контакта круглого лесоматериала из третьего ряда с двумя круглыми лесоматериалами из четвёртого ряда:

$$l_{3,4ЦХ} = \sqrt{\left(\frac{d_{3Cp}}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_{3Cp}d_{4Cp}}{2(d_{3Cp} + d_{4Cp})}\right)^2}. \quad (14)$$

Зависимость для расчёта расстояния от центра круглого лесоматериала, находящегося в четвёртом ряду, до прямой (хорды), соединяющей точки контакта круглого лесоматериала из четвёртого ряда с двумя круглыми лесоматериалами из третьего ряда, имеет вид:

$$l_{4,3ЦХ} = \sqrt{\left(\frac{d_{4Cp}}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_{3Cp}d_{4Cp}}{2(d_{3Cp} + d_{4Cp})}\right)^2}. \quad (15)$$

Если в рядах плоской сплочной единицы круглые лесоматериалы имеют одинаковый диаметр в верхнем отрезе, то будут справедливы следующие равенства:

$$d_{Cp} = d_{1Cp} = d_{2Cp} = d_{3Cp} = d_{4Cp}; \quad (16)$$

$$l_{ЦХ} = l_{1,2ЦХ} = l_{2,1ЦХ} = l_{2,3ЦХ} = l_{3,2ЦХ} = l_{3,4ЦХ} = l_{4,3ЦХ}. \quad (17)$$

Максимально допустимая укладка рядов круглых лесоматериалов $n_{B\max}$ в плоской сплочной единице рассчитывается по формуле

$$n_{B\max} = m_{лх} - \left(\frac{m_{лх}}{2} - 1\right), \quad (18)$$

где $m_{лх}$ — расчётное количество расстояний от центра круглого лесоматериала до хорды.

В формуле (18) расчётное количество расстояний от центра круглого лесоматериала до хорды составит:

$$m_{лх} = \frac{H_{ППСЕ} - d_{Cp}}{l_{ЦХ}}. \quad (19)$$

Полученное по формуле (19) расчётное значение округляется в меньшую сторону до целого числа. Причём если $m_{лх}$ — чётное число, то данное значение используется в зависимости (18) без изменений. В том случае, когда $m_{лх}$ — нечётное число, зависимость (18) примет следующий вид:

$$n_{B\max} = (m_{лх} - 1) - \left(\frac{(m_{лх} - 1)}{2} - 1\right). \quad (20)$$

На основе равенств (16) и (17) и с учётом того, что при расчёте $m_{лх}$ по формуле (19) полученное значение является чётным числом, фактическая высота плоской сплочной единицы будет рассчитываться по формуле

$$H_{ФПСЕ} = d_{Cp} + m_{лх} l_{ЦХ}. \quad (21)$$

Когда $m_{лх}$, рассчитанное по формуле (19), будет нечётным числом, фактическая высота плоской сплочной единицы определяется из выражения

$$H_{ФПСЕ} = d_{Cp} + (m_{лх} - 1) l_{ЦХ}. \quad (22)$$

Обоснование геометрических параметров высокоэффективной плоской сплочной единицы по представленной методике позволит наиболее рационально определить

проектные и фактические габаритные размеры сплоточной единицы для определённых условий плавания, которые необходимо использовать при изготовлении данной транспортной единицы.

4. Обсуждение и заключение

Предложенная плоская сплоточная единица является высокоэффективной, т. к. имеет простую конструкцию, высокий коэффициент полндревесности из-за того, что каждый круглый лесоматериал верхнего ряда укладывается между двумя круглыми лесоматериалами нижнего ряда и изготавливается в сплоточной машине или на грузовой платформе. Данные факторы обеспечивают низкие затраты на изготовление плоской сплоточной единицы при максимальном содержании древесины в габаритном объёме.

Предложена методика обоснования геометрических параметров плоской сплоточной единицы, которая учитывает конструктивные особенности сплоточной единицы, характер укладки круглых лесоматериалов в её рядах, а также минимальную ширину и глубину сплавного хода на эксплуатируемых водных объектах.

Приведённая методика даёт возможность наиболее точно рассчитать проектную (максимально возможную) ширину, длину и высоту плоской сплоточной единицы с последующим установлением фактической (рабочей) ширины, длины и высоты сплоточной единицы, которые должны использоваться при изготовлении плоской сплоточной единицы для конкретных транспортных условий. Таким образом, практическое использование расчётных значений фактической ширины, длины и высоты плоской сплоточной единицы даст возможность выполнить экономически выгодный первоначальный и магистральный сплав лесоматериалов на базе разработанной плоской сплоточной единицы с максимальным использованием пропускной способности водного пути.

Список литературы

1. Heinze M., Fiedler H. J. Water Consumption, Nutrition and Growth of Pine Seedlings under the Conditions of Different Radiation Intensity, Watering and Fertilization // *Flora*. 1980. Vol. 169, is. 1. P. 89—103. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0367-2530\(17\)31167-2](https://doi.org/10.1016/S0367-2530(17)31167-2).
2. The Role of Vegetation Management for Enhancing Productivity of the World's Forests / R. G. Wagner, K. M. Little, B. Richardson [et al.] // *Forestry*. 2006. Vol. 79, is. 1. P. 57—79. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpi057>.
3. Thinning Effect on Height and Radial Growth of *Pinus thunbergii* Parlat. Trees with Special Reference to Trunk Slenderness in a Matured Coastal Forest in Hokkaido, Japan / K. Masaka, H. Sato, H. Torita [et al.] // *Journal of Forest Research*. 2013. Vol. 18, is. 6. P. 475—481. DOI: 10.1007/s10310-012-0373-y.
4. Simulated Productivity of One- and Two-Armed Tree Planting Machines / B. T. Ersson, L. Jundén, U. Bergsten [et al.] // *Silva Fennica*. Vol. 47, no. 2, art. 958. DOI: 10.14214/sf.958.
5. Competitiveness of Mechanized Tree Planting in Finland / H. Hallongren, T. Laine, J. Rantala [et al.] // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2014. Vol. 29, is. 2. P. 144—151. DOI: 10.1080/02827581.2014.881542.

6. *Nieuwenhuis M., Egan D.* An Evaluation and Comparison of Mechanised and Manual tree Planting on Afforestation and Reforestation Sites in Ireland // *International Journal of Forest Engineering*. 2002. Vol. 13, is. 2. P. 11—23. DOI: 10.1080/14942119.2002.10702459.
7. *Rantala J., Laine T.* Productivity of the M-Planter Tree-Planting Device in Practice // *Silva Fennica*. 2010. Vol. 5, no. 44. P. 859—869. DOI: 10.14214/sf.125.
8. Factors Affecting the Success of Direct Seeding for Lowland Afforestation in the UK / I. Willoughby, R. L. Jinks, G. Kerr [et al.] // *Forestry*. 2004. Vol. 77, is. 5. P. 467—482. DOI: 10.1093/forestry/77.5.467.
9. Economic Analysis of Stand Establishment for Scots Pine / K. Hyytiäinen, S. Ilomäki, A. Mäkelä [et al.] // *Canadian Journal of Forest Research*. 2006. Vol. 36, no. 5. P. 1179—1189. DOI: 10.1139/x06-023.
10. Лесозексплуатация: Учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. И. Пятакин [и др.]. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 320 с.
11. *Шелгунов Ю. В., Шейнин Я. Г., Ларионов Л. А.* Лесозексплуатация. М.: Лесн. пром-сть, 1975. 304 с.
12. *Rukomajnikov K. P., Vedernikov S. V., Gabdrahmanov M. G.* A Method for Delimbing Tree-Trunks and a Device for Applying the Method // *Journal of Applied Engineering Science*. 2018. Vol. 16, no. 2. P. 263—266. DOI: <https://doi.org/10.5937/jaes16-16442>.
13. *Сеннов С. В.* Лесоведение и лесоводство: Учебник для студ. вузов. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 256 с.
14. *Овчинников М. М., Полищук В. П., Григорьев Г. В.* Транспорт леса: В 2 т. Т. 2. Лесосплав и судовые перевозки: Учебник для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2009. 208 с.
15. Транспорт леса: В 2 т. Т. 1. Сухопутный транспорт / Под ред. Э. О. Салминена. М.: Издательский центр «Академия», 2009. 368 с.
16. *Васильев В. В., Афоничев Д. Н.* Усовершенствованные системы плотового сплава лесоматериалов: [монография]. Saarbrücken (Германия): Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 284 с.
17. *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.
18. Patent 5119529 USA, Int. Cl.5 B63B 35/62. Cable hook / Wire Rope Industries Ltd., PointeClaire, Canada. No. 703,844; filed: 21.05.1991; date application 09.06.1992.
19. 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 03.03.05; la date de parution 21.10.2005, bulletin 06/36. 14 p.
20. Feasibility study of geometrical parameters of wood transportation roads including prediction of optimum terms of construction and retrofitting sequence / A. V. Skrypnikov, V. G. Kozlov, V. A. Zelikov [et al.] // *Civil Engineering and Architecture*. 2021. No. 9 (6). P. 2077—2083. DOI: 10.13189/cea.2021.090635.
21. A linear model of the forest transport network and an algorithm for assessing the influence of the density of points and the length of links in developing multi-forested areas / V. V. Nikitin, A. V. Skrypnikov, V. G. Kozlov [et al.] // *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2021. No. 69 (12). P. 175—178. DOI: 10.14445/22315381/IJETT-V69I12P220.
22. Algorithm for determining the curvature of the project line of a truck haul road and the rate of change in its curvature / A. O. Borovlev, A. V. Skrypnikov, V. G. Kozlov

- [et al.] // Civil Engineering and Architecture. 2021. No. 9 (5). P. 1582—1589. DOI: 10.13189/CEA.2021.090528.
23. Patent 3556319 USA, Int. Cl. B63b 27/16. Log-bundling apparatus / M. Ray Holden, P. O. Box 716, Ketchikan, Alaska. No. 857,247; filed: 30.06.1969; date application 19.01.1971.
24. Patent 3971309 USA, Int. Cl. B63B 27/16. Log bundling apparatus and method of bundling logs / Wilfred Spry Brodie, P. O. Box 175, Gibsons, British Columbia, VON 1VO, Canada. No. 566,904; filed: 10.04.1975; date application 27.07.1976.
25. Машины и механизмы для лесовозных железных дорог / Ю. Л. Шевченко, В. Н. Еремичев, Д. Ю. Почтарь [и др.]. М.: Гослесбумиздат, 1980. 144 с.
26. 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.
27. Васильев В. В. Модернизированный плот для рек с малыми глубинами // Вестник ПГТУ. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2015. № 1. С. 45—58.
28. 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.
29. Васильев В. В., Афоничев Д. Н. Расчёт прочности гибкого водонепроницаемого материала плоских сплоточных единиц со стабилизированным запасом плавучести // Resources and Technology. 2022. Т. 19, № 2. С. 77—102. DOI: 10.15393/j2.art.2022.6203.
30. 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.
31. Васильев В. В. Обоснование параметров транспортно-технологической схемы поставки древесины в плоских сплоточных единицах по принципу плот (линейка) — плот // Resources and Technology. 2021. Т. 18, № 2. С. 48—78. DOI: 10.15393/j2.art.2021.5603.
32. 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 имени Г. Ф. Морозова», 2020. С. 335—340.
33. 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.
34. Патент 210485 Р. Ф., МПК В63В 35/62. Плоская сплоточная 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 имени Г. Ф. Морозова» (RU). № 2021125409; заявл. 19.10.2020; опубл. 18.04.2022, Бюл. № 11. 5 с.
35. Патент 2777674 Р. Ф., МПК В65В 35/02, В65G 69/20. Плоская сплоточная 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 имени Г. Ф. Морозова» (RU). № 2021140068; заявл. 30.12.2021; опубл. 08.08.2022, Бюл. № 22. 8 с.
36. Патент 199681 Р. Ф., МПК В65G 69/00, 57/18. Сплоточная 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 имени Г. Ф. Морозова» (RU). № 2020119839; заявл. 08.06.2020; опубл. 14.09.2020, Бюл. № 26. 5 с.
37. 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.
38. Патент 2777676 Р. Ф., МПК В65В 35/02. Плоская сплоточная 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 имени Г. Ф. Морозова» (RU). № 2021140062; заявл. 30.12.2021; опубл. 08.08.2022, Бюл. № 22. 8 с.

References

1. Heinze M., Fiedler H. J. Water Consumption, Nutrition and Growth of Pine Seedlings under the Conditions of Different Radiation Intensity, Watering and Fertilization. *Flora*, 1980, vol. 169, is. 1, pp. 89—103. doi: [https://doi.org/10.1016/S0367-2530\(17\)31167-2](https://doi.org/10.1016/S0367-2530(17)31167-2).
2. Wagner R. G., Little K. M., Richardson B., McNabb K. The Role of Vegetation Management for Enhancing Productivity of the World's Forests. *Forestry*, 2006, vol. 79, is. 1, pp. 57—79. doi: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpi057>.
3. Masaka K., Sato H., Torita H., Kon H., Fukuchi M. Thinning Effect on Height and Radial Growth of *Pinus thunbergii* Parlat. Trees with Special Reference to Trunk Slenderness in a Matured Coastal Forest in Hokkaido, Japan. *Journal of Forest Research*, 2013, vol. 18, is. 6, pp. 475—481. doi: 10.1007/s10310-012-0373-y.
4. Ersson B. T., Jundén L., Bergsten U., Servin M. Simulated Productivity of One- and Two-Armed Tree Planting Machines. *Silva Fennica*, vol. 47, no. 2, art. 958. doi: 10.14214/sf.958.
5. Hallongren H., Laine T., Rantala J., Saarinen V.-M., Strandström M., Hämäläinen J., Poikela A. Competitiveness of Mechanized Tree Planting in Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2014, vol. 29, is. 2, pp. 144—151. doi: 10.1080/02827581.2014.881542.
6. Nieuwenhuis M., Egan D. An Evaluation and Comparison of Mechanised and Manual tree Planting on Afforestation and Reforestation Sites in Ireland. *International Journal of Forest Engineering*, 2002, vol. 13, is. 2, pp. 11—23. doi: 10.1080/14942119.2002.10702459.
7. Rantala J., Laine T. Productivity of the M-Planter Tree-Planting Device in Practice. *Silva Fennica*, 2010, vol. 5, no. 44, pp. 859—869. doi: 10.14214/sf.125.
8. Willoughby I., Jinks R.L., Kerr G., Gosling P. G. Factors Affecting the Success of Direct Seeding for Lowland Afforestation in the UK. *Forestry*, 2004, vol. 77, is. 5, pp. 467—482. doi: 10.1093/forestry/77.5.467.

9. Hyytiäinen K., Ilomäki S., Mäkelä A., Kinnunen K. Economic Analysis of Stand Establishment for Scots Pine. *Canadian Journal of Forest Research*, 2006, vol. 36, no. 5, pp. 1179—1189. doi: 10.1139/x06-023.
10. Patyakin V. I., Salminen E. O., Bit Yu. A., Birman A. R., Avdashkevich S. V., Bessarab G. A., Katsadze V. A., Grigoriev I. V., Kamusin A. A., Shelgunov Yu. V., Yartsev I. V. *Forest exploitation*. Textbook for students. higher. studies. Institutions. Moscow, Publishing center «Academy», 2006. 320 p. (In Russ).
11. Shelgunov Yu. V., Sheinin Ya. G., Larionov L. A. *Forest exploitation*. Moscow, Lesn. prom-st, 1975. 304 p. (In Russ).
12. Rukomojnikov K. P., Vedernikov S. V., Gabdrahmanov M. G. A Method for Delimbing Tree-Trunks and a Device for Applying the Method. *Journal of Applied Engineering Science*, 2018, vol. 16, no. 2, pp. 263—266. doi: <https://doi.org/10.5937/jaes16-16442>.
13. Sennov S. V. *Forestry and forestry*. Textbook for students. Moscow, Publishing Center «Academy», 2005. 256 p. (In Russ).
14. Ovchinnikov M. M., Polishchuk V. P., Grigoriev G. V. *Forest transport*. In 2 t. T. 2. *Logging and ship transportation*. Textbook for students. higher. studies. Moscow, Publishing Center «Academy», 2009. 208 p. (In Russ).
15. *Forest transport*. In 2 t. T. 1. *Land transport*. Ed. by E. O. Salminen. Moscow, Publishing Center «Academy», 2009. 368 p. (In Russ.).
16. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. *Improved systems of raft timber alloy*: [monograph]. Saarbrücken (Germany), Publishing house LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 284 p. (In Russ).
17. 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.
18. Wire Rope Industries Ltd., Pointe-Claire, Canada. Patent 5119529 USA, Int. CI.5 B63B 35/62. Cable hook. No. 703,844; filed: 21.05.1991; date application 09.06.1992.
19. 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 03.03.05; the date of publication 21.10.2005, bulletin 06/36. 14 p.
20. Skrypnikov A. V., Kozlov V. G., Zelikov V. A., Tikhomirov P. V., Levushkin D. M., Nikitin V. V., Sokol P. A. Feasibility study of geometrical parameters of wood transportation roads including prediction of optimum terms of construction and retrofitting sequence. *Civil Engineering and Architecture*, 2021, no. 9 (6), pp. 2077—2083. doi: 10.13189/cea.2021.090635.
21. Nikitin V. V., Skrypnikov A. V., Kozlov V. G., Bryukhovetsky A. N., Manukovsky A. Y., Vysotskaya I. A., Sapelkin R. S. A linear model of the forest transport network and an algorithm for assessing the influence of the density of points and the length of links in developing multi-forested areas. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 2021, no. 69 (12), pp. 175—178. doi: 10.14445/22315381/IJETT-V69I12P220.
22. Borovlev A. O., Skrypnikov A. V., Kozlov V. G., Teterevleva E. V., Burmistrov V. A., Mikheevskaya M. A., Chemshikova Y. M. Algorithm for determining the curvature of the project line of a truck haul road and the rate of change in its curvature. *Civil Engineering and Architecture*, 2021, no. 9 (5), pp. 1582—1589. doi: 10.13189/CEA.2021.090528.
23. Ray Holden M., P. O. Box 716, Ketchikan, Alaska. Patent 3556319 USA, Int. CI. B63b 27/16. Log-bundling apparatus. No. 857, 247; filed: 30.06.1969; date application 19.01.1971.

24. Wilfred Spry Brodie, P. O. Box 175, Gibsons, British Columbia, VON 1VO, Canada. Patent 3971309 USA, Int. Cl.2 B 63 B 27/16. Log bundling apparatus and method of bundling logs. No. 566,904; filed: 10.04.1975; date application 27.07.1976.
25. Shevchenko Y. L., Eremichev V. N., Pochtar D. Yu., Syundyukov H. H. *Machines and mechanisms for logging railways*. Moscow, Goslesbumizdat, 1980. 144 p. (In Russ.).
26. 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.).
27. Vasiliev V. V. Modernized raft for rivers with shallow depths. *Vestnik PSTU. Series: Forest. Ecology. Environmental management PSTU*, 2015, no. 1, pp. 45—58. (In Russ.).
28. 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.).
29. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. Calculation of the strength of a flexible waterproof material of flat flat units with a stabilized buoyancy reserve. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 77—102. doi: 10.15393/j2.art.2022.6203. (In Russ.).
30. 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.).
31. Vasiliev V. V. Substantiation of the parameters of the transport and technological scheme for the supply of wood in flat raft units according to the raft (ruler) — raft principle. *Resources and Technology*, 2021, vol. 18, no. 2, pp. 48—78. doi: 10.15393/j2.art.2021.5603. (In Russ.).
32. 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.).
33. 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.).
34. 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.).
35. 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.).
36. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Morkovin V. A., Pozdnyakov 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, Byul. No. 26. 5 p. (In Russ.).

37. 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, Byul. No. 28.10 p. (In Russ.).
38. 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.).

© Васильев В. В., Афоничев Д. Н., 2023

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6963

УДК 631.331

Статья

Новое предохранительное устройство для привода лесных почвообрабатывающих машин

Зимарин Сергей Викторович

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

Четверикова Ирина Владимировна

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

Щеблыкин Павел Николаевич

кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), pashavai@mail.ru

Боровиков Роман Геннадьевич

кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), borovikov_roman@mail.ru

Получена: 28 марта 2023 / Принята: 28 апреля 2023 / Опубликовано: 4 мая 2023

Аннотация: В данной работе обоснована работоспособность нового предохранительного устройства кулачкового типа, проведены экспериментальные исследования процесса срабатывания предохранительного устройства, установленного в карданном приводе почвообрабатывающей машины. Исследован новый двухкулачковый предохранитель с упругим резиновым элементом с учётом динамических параметров системы, реализован полнофакторный эксперимент. Выявлены преимущества в конструктивном исполнении предложенного предохранителя. Получена регрессионная модель влияния параметров предохранительного устройства на динамическую нагруженность, позволяющая осуществлять разработку машин лесного комплекса, имеющих в своей конструкции предохранительные устройства, устанавливаемые в приводных узлах, и определять влияние угла наклона промежуточного вала и момента инерции системы с учётом их частот вращения. Выявлено, что увеличение таких варьируемых факторов, как частота вращения, угол наклона промежуточного

вала и момент инерции системы, влечёт рост динамической нагрузки, а наиболее значимое влияние на величину максимальной динамической нагрузки оказывает частота вращения, менее сильное — момент инерции, наименьшее — угол наклона. Установлено, что угол отклонения наклона промежуточного вала для минимизации величин динамических нагрузок должен находиться в пределах от 0 до 15 град. с учётом значений моментов инерции вращающихся элементов привода, на которых установлен предохранитель, а также в пределах значений от 0,012—0,024 Нмс. Определены оптимальные величины частоты вращения и угла наклона промежуточного вала, обеспечивающие минимальную динамическую нагруженность. Проведённые исследования могут быть эффективно использованы при дальнейшей разработке машин лесного комплекса с учётом конструкций предохранительных устройств и их динамической нагруженности.

Ключевые слова: лесное хозяйство; почвообрабатывающая машина; карданный привод; предохранительные устройства; динамические нагрузки

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6963

Article

New safety device for the driving system of forest tillage machines

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

Pavel Shcheblykin

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

Roman Borovikov

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

Received: 28 March 2023 / Accepted: 28 April 2023 / Published: 4 May 2023

Abstract: The paper substantiates the operability of a new cam-type safety device due to the results of experimental studies of a safety device function installed in a cardan drive of a tillage machine. A new two-cam safety unit with an elastic rubber element was studied in the course of a full-factor experiment taking into account the dynamic parameters of the system. The advantages of the proposed safety unit design are revealed. The authors obtained a regression model of the safety device parameters influence on the dynamic loading. The model allows designing forest complex machines with safety devices installed in the drive units and determining the influence of the subshaft inclination and the moment of inertia of the system taking into account their rotational speeds. It is revealed that an increase of such variable factors values as rotation speed, the angle of inclination of the subshaft and the moment of inertia of the system results in dynamic loading increase. The frequency of rotation exerts the most significant effect on the value of the maximum dynamic loading while the moment of inertia has less effect and the angle of inclination exerts the least one. To minimize the values of dynamic loading the angle of inclination of the subshaft should be in the range from 0 to 15

degrees, taking into account the values of the moments of inertia of the rotating drive elements on which the safety unit is installed, also in the range of values from 0.012 – 0.024 Nm. The optimal values of the rotation speed and the angle of inclination of the subshaft are determined thus ensuring minimal dynamic loading. The research results may be effectively used in the further development of forest complex machines taking into account the designs of safety devices and their dynamic loading.

Keywords: forestry; tillage machine; cardan drive; safety devices; dynamic loads

1. Введение

Почвообрабатывающие машины, имеющие в своей структуре активные приводные элементы, осуществляющие передачу крутящего момента на рабочие органы, в процессе своей работы контактируют с препятствиями (камни, пни, крупные корни и др.). Всё это сопровождается динамическими нагрузками и ударами, которые приводят к поломке или разрушению как рабочих органов, так и привода или отдельных его деталей. Для осуществления их защиты от возникающих перегрузок и поломок в приводных линиях таких машин следует предусматривать установку предохранительных устройств, которые автоматически позволяют выполнить размыкание механизма в случае достижения предельной величины передаваемого момента.

Устанавливаемые на машины механизмы и предохранительные устройства должны обеспечивать передачу рабочей нагрузки, защитить рабочие органы и приводные линии от нарушения нормального режима работы.

Анализ существующих конструкций почвообрабатывающих машин и их привода [1—3] показал, что в них не предусмотрено наличие предохранительных устройств, защищающих их приводные узлы от нагрузок по крутящему моменту. Применяемые предохранительные устройства аналогичного типа [3—4] имеют большое количество используемых в них конструктивных узлов, элементов и деталей, что в дальнейшем в условиях их эксплуатации приводит к увеличению затрат на изготовление, сборку и техническое обслуживание как самого предохранителя, так и привода в целом. В главной степени это усложняет саму конструкцию, что негативно сказывается на точности и быстродействии срабатывания самого предохранителя.

Поэтому, исходя из недостатков имеющихся конструкций, предлагается в элементах привода карданного типа применение новой конструкции кулачкового предохранителя, отличающегося своей простотой конструкции и установки, что, в свою очередь, позволит снизить динамическую нагруженность приводных узлов всей машины за счёт повышения точности срабатывания.

Проведён анализ теоретических исследований, касающихся динамики нагруженности машин [5—7], снабжённых предохранительными устройствами размыкающего типа [8—9], устанавливаемых в приводных линиях машины [10—11]. Установлено, что отсутствуют исследования, касаемые изучения динамических нагрузок, возникающих в момент их срабатывания, которые в первоочередной очереди негативно сказываются на дальнейшей работе и эксплуатации всей машины в целом.

Таким образом, проведённые теоретические исследования динамики нагруженности лесохозяйственных машин дали возможность получить математическую модель влияния кинематических и динамических параметров предохранительного устройства на максимальные динамические нагрузки, возникающие в процессе его срабатывания. Это позволяет определить оптимальные конструктивно-технологические параметры

предохранительного устройства, обеспечивающие надёжную защиту привода машины от перегрузок.

В работе поставлена цель обоснования и подтверждения работоспособности нового предохранительного устройства кулачкового типа, установленного в карданном приводе почвообрабатывающей машины, а также, основываясь на проведении стендовых экспериментальных испытаний, провести аналитические исследования его процесса срабатывания с учётом динамических параметров системы.

2. Материалы и методы

Новое устройство, предназначенное для защиты передач карданного типа, применяемых в конструкциях лесохозяйственных и почвообрабатывающих машин (рисунок 1), представляет собой свободно установленную карданную вилку 2 и перемещаемую в осевом направлении по шлицам втулку 3. Упругий элемент 4 расположен во втулке 3, выполненной в виде ступицы. Двухкулачковые шайбы 5 смонтированы между втулкой 3 и вилок. Одна из шайб 5 соединена с втулкой 3 и упругим элементом 4. Регулировочные гайки 7, контактируя с цилиндрической пружиной 6, осуществляют требуемое прижатие шайб 5 между собой.

Работа предохранителя кулачкового типа происходит по следующей схеме. В начале эксплуатации предохранитель регулируется при помощи продольно перемещающихся по валу 1 регулировочных гаек 6. Благодаря этому происходит увеличение или уменьшение величины давления, т.е. усилия прижатия, на поверхности двухкулачковых шайб 5. В нормальном режиме эксплуатации крутящий момент от фигурной вилки 2 передаётся на вал 1 посредством втулки 3 и шайб 5. В случае перегрузки втулка 3 и вал 1 прекращают вращение, при этом втулка 3, воздействуя на пружину, сжимает её, а зубья двухкулачковых шайб размыкаются. Далее предохранитель срабатывает с пробуксовкой.

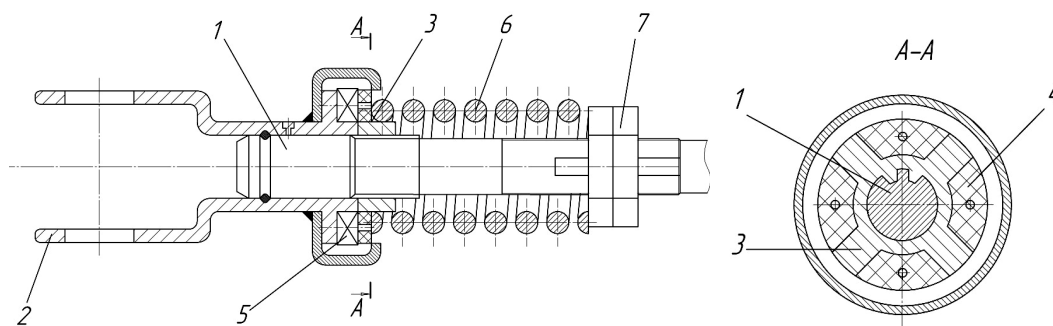


Рисунок 1. Предохранительное устройство: 1 — вал; 2 — вилка; 3 — втулка; 4 — упругий элемент; 5 — двухкулачковые шайбы; 6 — пружина; 7 — регулировочные гайки

Figure 1. Safety device: 1 — shaft; 2 — fork; 3 — sleeve; 4 — elastic element; 5 — two-cam washers; 6 — spring; 7 — adjusting nuts

Для реализации исследований в лабораторных условиях и выполнения экспериментальных задач применялся стенд (фото 1), позволяющий осуществлять имитацию перегрузки рабочих элементов машин с последующим срабатыванием предохранителя карданного типа. Крутящий момент передавался от электродвигателя переменного тока, обладающего мощностью 3 кВт и фактической частотой вращения его вала 1430 мин^{-1} . Вследствие того, что большинство машин, работающих в лесном хозяйстве, имеет диапазон вращения их приводных линий (карданного вала) от 300 до 650 мин^{-1} , то и на стенде он соответствовал этому интервалу. Заданный интервал вращения достигался установкой на вал электродвигателя вариаторного шкива. За счёт перемещения электродвигателя по специальным пазам в раме стенда путём изменения межосевого расстояния осуществлялось требуемое натяжение приводного ремня.

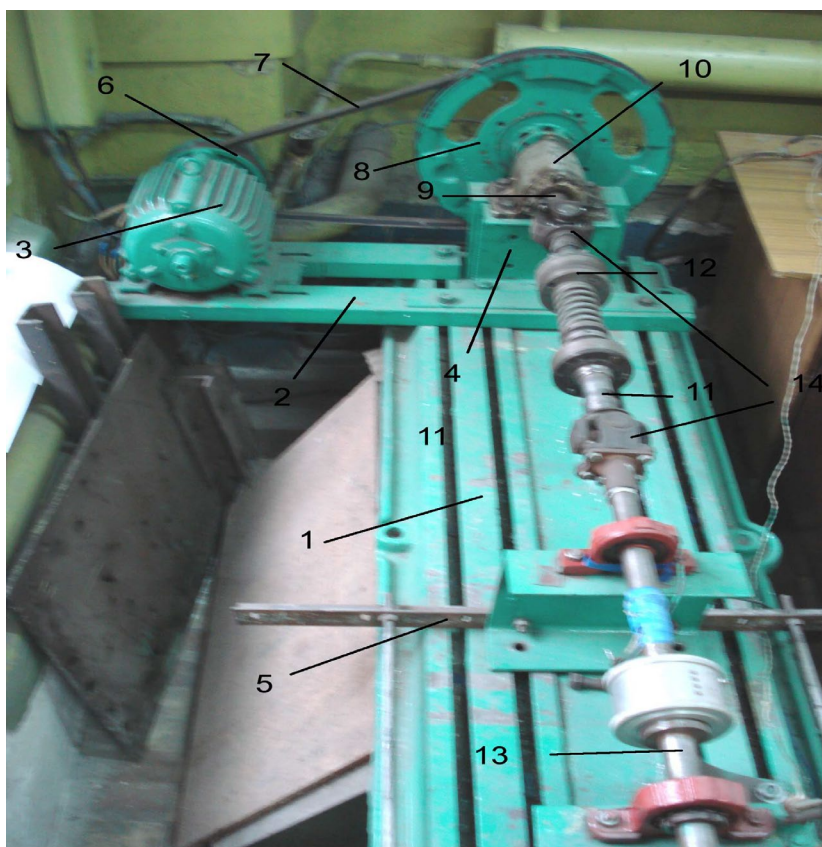


Фото 1. Стенд для испытания предохранительного устройства: 1 — плита; 2 — рама; 3 — электродвигатель; 4 — стойка под подшипники; 5 — специальная рама; 6 — вариаторный шкив; 7 — клиновой ремень; 8 — шкив; 9, 13 — валы; 10 — корпус подшипника; 11 — карданный вал; 12 — предохранительная муфта; 14 — шарнир

Photo 1. Test bench: 1 — plate; 2 — frame; 3 — electric motor; 4 — bearing rack; 5 — special frame; 6 — variable-speed pulley; 7 — V-belt; 8 — pulley; 9, 13 — shafts; 10 — bearing housing; 11 — cardan shaft; 12 — safety clutch; 14 — hinge

При помощи тарировочной пружины применяемые предохранительные устройства подвергались регулированию на момент, при котором будет происходить их срабатывание. Определение величин крутящих моментов, возникающих на валу, осуществлялось применением метода электротензометрирования с использованием наклеенных на вал тензометрических датчиков, работающих на кручение, и ртутных токосъёмников, которые специально предназначены для снятия сигналов и их передачи с вращающихся частей исследуемых объектов стенда на усилительную аппаратуру. Применение токосъёмников ртутного типа позволяет осуществить высокую точность снимаемых показаний, т. к. контакт скользящих поверхностей между собой отсутствует. Частота валов стенда определялась индукционными датчиками.

Места установки датчиков и токосъёмников представлены на фото 2. Используя усилитель ТА-5 на четыре канала с рабочим диапазоном от 0 до 1000 Гц, осуществлялось деление передаваемых сигналов с тензодатчиков. Все электрические сигналы, поступающие от усилительной аппаратуры, обрабатывались программой GeieDAQ на ЭВМ с использованием аналоговых модулей ввода-вывода и преобразователя интерфейса RS-232/RS-485 (ADAM-4520).

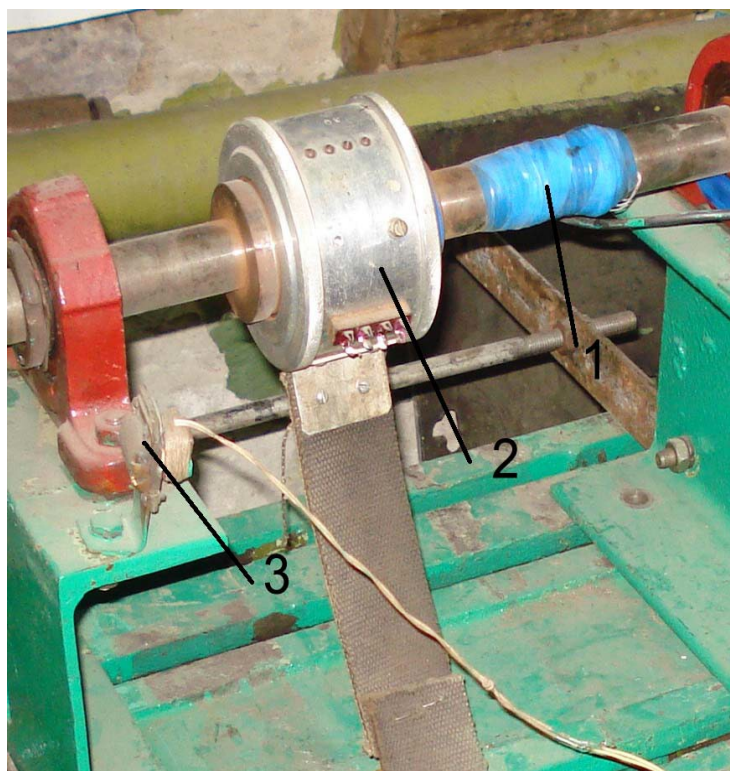


Фото 2. Места установки: 1 — тензометрических датчиков, 2 — токосъёмника; 3 — индукционного датчика

Photo 2. General view: 1 — strain gauges, 2 — current collector; 3 — induction sensor

Исследования предполагали построение регрессионной модели влияния на величину максимальных динамических нагрузок (крутящего момента) частоты вращения, угла наклона промежуточного вала и момента инерции системы; для решения поставленной задачи был реализован полнофакторный эксперимент.

3. Результаты

За варьируемые факторы были приняты: частота вращения (n), угол наклона промежуточного вала (γ) и момент инерции системы (J).

Обозначение факторов и их уровни представлены в таблице 1. Функция отклика (y) — динамическая нагрузка.

Таблица 1. Определение уровней и интервалов варьирования факторов

Table 1. Levels and intervals of factors variation

Фактор			Уровни факторов, град.			Интервал варьирования
Наименование	Обозначение					
	натуральное	нормали- зованное	верхний	основной	нижний	
Частота вращения, мин ⁻¹	n	x ₁	650	500	350	150
Угол наклона, град.	γ	x ₂	15	10	5	5
Момент инерции, кгм ²	J	x ₃	0,036	0,024	0,012	0,012

Для проверки нормальности распределения выходной величины была проведена серия из 30 опытов при $n = 350$ мин⁻¹, $\gamma = 5$ град, $J = 0,012$ кгм². Результаты этой серии представлены в таблице 2.

Статистическая обработка результатов этой серии была проведена с использованием программы Excel (таблица 3), расчётные значения $As_{\text{расч.}} = 0,471$, $Ex_{\text{расч.}} = 0,684$. Табличные критические значения по абсолютной величине больше расчётных: $As_{\text{крит.}} > As_{\text{расч.}}$ и $Ex_{\text{крит.}} > Ex_{\text{расч.}}$ ($0,865 > 0,684$; $0,661 > 0,471$), что свидетельствует в пользу гипотезы о нормальном распределении выходной величины.

Таблица 2. Результаты серии опытов

Table 2. Results of experiments

№ опыта	Нв, Вт	№ опыта	Нв, Вт	№ опыта	Нв, Вт
1	114	11	111	21	121
2	118	12	114	22	120
3	113	13	112	23	115
4	113	14	110	24	116
5	113	15	115	25	117
6	119	16	114	26	114
7	109	17	112	27	113
8	115	18	117	28	117
9	113	19	108	29	118
10	106	20	118	30	116

Таблица 3. Результаты расчёта в Excel

Table 3. Calculation in Excel

Среднее	114
Стандартная ошибка	0,638
Медиана	114
Стандартное отклонение	3,499
Дисперсия выборки	12,24
Эксцесс	0,0689
Асимметричность	-0,3287
Минимум	106
Максимум	121
Уровень надёжности (95 %)	1,306

Для уточнения гипотезы о нормальности распределения функции отклика проведём проверку по критерию χ^2 -Пирсона. Для этого разбиваем выборку на шесть интервалов (таблица 4).

Таблица 4. Расчёт критерия Пирсона

Table 4. Pearson's criterion

Интервал	Левый конец интервала	Правый конец интервала	Середина интервала	Частота (p_i)	$p_i(y_i - y_{cp})^2$	Частоты теоретические ($p_{i\text{теор.}}$)	$(p_i - p_{i\text{теор.}})^2 / p_{i\text{теор.}}$
1	106	108,5	107,25	2	95,680556	1,107514	0,71920635
2	108,5	111	109,75	4	78,027778	3,782154	0,01254757
3	111	113,5	112,25	5	18,368056	7,512943	0,84053375
4	113,5	116	114,75	10	3,4027778	8,680842	0,20046188
5	116	118,5	117,25	6	57,041667	5,834377	0,0047016
6	118,5	121	119,75	3	93,520833	2,28091	0,22670392

Расчётное значение критерия χ^2 -Пирсона составило 2,004. Табличное значение критерия χ^2 -Пирсона для данной выборки при трёх степенях свободы равно 7,815, исходя из $7,815 > 2,004$, принимаем гипотезу нормального распределения случайной величины. Определим необходимое количество дублированных опытов (n) по выражению $n = t^2 s^2 / \Delta^2 = 4,19$, где s^2 , Δ , t — соответственно дисперсия, доверительный интервал и критерий Стьюдента.

Матрица планирования основного эксперимента по определению мощности вращения диска и результаты опытов представлены в таблице 5, где y_j , s_j^2 — соответственно среднее значение отклика и дисперсия.

Таблица 5. Матрица планирования эксперимента

Table 5. Experiment planning

№ опыта	x_1	x_2	$x_1 x_2$	y_1 , Нм	y_2 , Нм	y_3 , Нм	y_4 , Нм	y_5 , Нм	y_j , Нм	s_j^2
1	-1	-1	1	115	112	118	117	109	114,2	13,7
2	1	-1	-1	224	223	221	226	219	222,6	7,3
3	-1	1	-1	126	125	126	127	122	125,2	3,7
4	1	1	1	246	242	248	240	248	244,8	13,2
5	-1	-1	1	168	170	168	168	166	168	2
6	1	-1	-1	327	329	326	317	329	325,6	24,8
7	-1	1	-1	191	186	191	195	193	191,2	11,2
8	1	1	1	368	360	368	367	367	366	11,5

По критерию Кохрена проводим проверку однородности дисперсий опытов. Наибольшая дисперсия шестого опыта $S_6^2 = 24,8$, отсюда $G_{расч.} = 0,284$. По таблице распределения критерия Кохрена для нашего случая находим $G_{табл.} = 0,46$. Неравенство $G_{расч.} < G_{табл.}$ позволяет сделать вывод об однородности дисперсий опытов. Регрессионную модель тягового усилия будем искать в виде многочлена по равенству $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3$. Расчётные коэффициенты регрессионной модели представлены в таблице 6.

Таблица 6. Коэффициенты регрессии математической модели

Table 6. Data on regression coefficients

b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
219,7	70,05	12,1	43	3,55	13,05	3,8	0,75

Предварительно определяем дисперсии коэффициентов регрессии: $S^2\{b_i\} = 0,27$.

Для каждого коэффициента регрессии среднеквадратичное отклонение составляет $S^2\{b_i\} = 0,52$. Оценку значимости коэффициентов регрессии проводим, рассчитывая неравенство $|b_i| \leq t_{табл.} S\{b_i\}$.

Из таблиц t-распределения Стьюдента выбираем значение $t_{табл.}$ при уровне значимости $q = 0,01$ и числе степеней свободы $f_y = 32$, тогда $t_{табл.} = 2,74$, следовательно, $t_{табл.} S\{b_i\} = 1,43$. Вышеуказанное соотношение не выполняется для коэффициентов b_{123} ($0,75 < 1,43$), поэтому этот коэффициент будем считать незначимым, а член $b_{12}x_1x_2$ исключаем из выражения. Отбросив незначимые члены, получим регрессионную модель в следующем виде:

$$Y = 219,7 + 70,05x_1 + 12,1x_2 + 43x_3 + 3,55x_1x_2 + 13,05x_1x_3 + 3,8x_2x_3. \quad (1)$$

Адекватность полученной модели проверим по F-критерию Фишера ($F_{табл.}$), если $F_{расч.} < F_{табл.}$, то модель считается адекватной. В нашем случае расчётное значение $F_{расч.} = 1,03$, а $F_{табл.} = 4,17$, условие $F_{расч.} < F_{табл.}$ ($1,03 < 4,17$) выполняется, следовательно, модель адекватна и может быть использована для описания объекта исследования.

По результатам эксперимента получены соответствующие графики. На рисунке 2 приведён график зависимости максимальной динамической нагрузки от частоты вращения и угла наклона при моменте инерции 0,024.

На рисунке 3 приведён график зависимости максимальной динамической нагрузки от частоты вращения при различных углах наклона и моментах инерции.

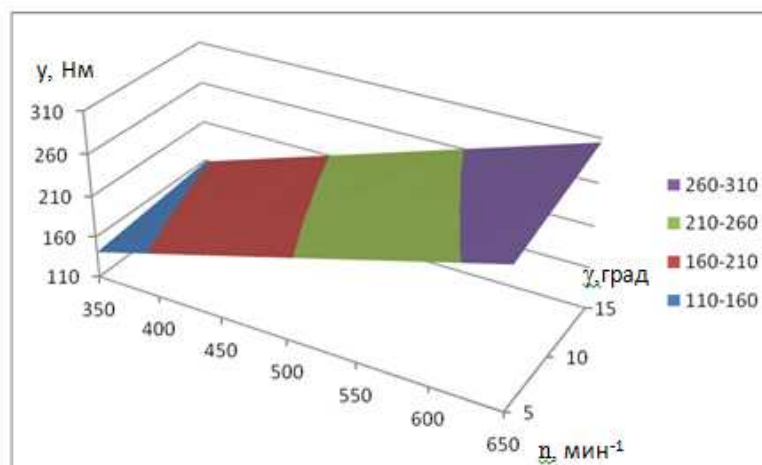


Рисунок 2. График зависимости максимальной динамической нагрузки от частоты вращения и угла наклона при моменте инерции 0,024

Figure 2. Dependence of the maximum dynamic load on the rotational speed and angle of inclination at a moment of inertia of 0.024

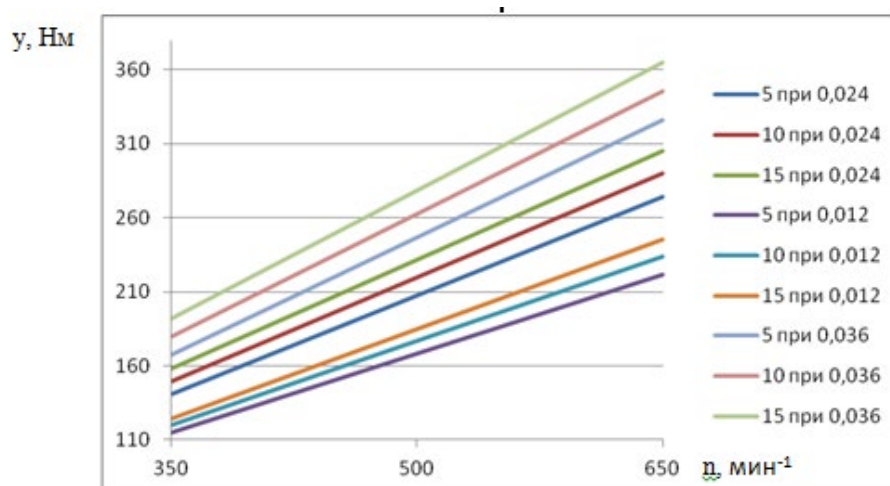


Рисунок 3. График зависимости максимальной динамической нагрузки от частоты вращения при различных углах наклона и моментах инерции

Figure 3. Dependence of the maximum dynamic load on the rotational speed

Проведя графический анализ (рисунки 2, 3) полученной модели (1), можно отметить, что увеличение всех факторов влечёт рост динамической нагрузки, наиболее значимое влияние на величину максимальной динамической нагрузки оказывает частота вращения, менее сильное — момент инерции, наименьшее — угол наклона, при этом с ростом момента инерции влияние угла наклона будет более выражено.

4. Заключение

Исследования позволили обосновать новую конструкцию предохранительного устройства карданной передачи для лесохозяйственных машин, построить математическую модель влияния частоты вращения, угла наклона промежуточного вала и момента инерции системы на максимальные динамические нагрузки, возникающие в её приводных элементах (деталях), и, следовательно, дают возможность обосновать оптимальные конструктивно-технологические параметры предохранительного устройства, обеспечивающего надёжную защиту орудия.

Установлено, что необходимо стремиться к минимизации максимальной динамической нагрузки, которая при этом не может быть меньше момента срабатывания предохранительного устройства. Так, для машин, работающих при номинальном вращающем моменте 250 Нм, оптимальные значения факторов x_1 (частота вращения) и x_2 (угол наклона промежуточного вала), согласно полученной регрессионной модели, составили: при x_3 (момент инерции системы), равном $0,036 \text{ кгм}^2$, — $x_1 = 542 \text{ мин}^{-1}$; $x_2 = 15^0$; при $x_3 = 0,024 \text{ кгм}^2$ — $x_1 = 458 \text{ мин}^{-1}$; $x_2 = 14^0$; при $x_3 = 0,012 \text{ кгм}^2$ не обеспечивается требуемый момент срабатывания ни при каких значениях факторов x_1 и x_2 ; для машин, работающих при номинальном вращающем моменте 160 Нм, оптимальные значения факторов x_1 и x_2 составили: при $x_3 = 0,036 \text{ кгм}^2$ — $x_1 = 350 \text{ мин}^{-1}$; $x_2 = 5^0$; при $x_3 = 0,024 \text{ кгм}^2$ — $x_1 = 361 \text{ мин}^{-1}$; $x_2 = 13^0$; при $x_3 = 0,012 \text{ кгм}^2$ — $x_1 = 443 \text{ мин}^{-1}$; $x_2 = 14^0$.

Полученная регрессионная модель может быть использована при разработке новых и модернизации существующих машин, применяемых как в лесном хозяйстве, так и других сферах, связанных с защитой их от перегрузок.

Проведённые исследования, предложенные в данной статье, могут быть эффективно использованы при дальнейшей разработке машин лесного комплекса с учётом конструкций предохранительных устройств и их динамической нагруженности.

Список литературы

1. Plate cultivation units Hamal-Bomet. URL: [http:// www.bomet.pl/oferta_tekst-77.html](http://www.bomet.pl/oferta_tekst-77.html). Text. Image: electronic.
2. Operating manual KF 00.000 RE. Milling cultivators. URL: <https://mct-trade.ru/downloads/pdf/KF.pdf>. Text. Image: electronic.
3. BY Patent No. 20,090,960 / Sashko K. V., Romanyuk N. N., Borovets G. V. [et al.]. 2009. 17 November.
4. Бородин Н. А., Князев А. В., Максименков А. И. Конструктивные схемы размыкания предохранительных муфт // Актуальные направления исследований XXI века: теория и практика. Воронеж, 2016. № 4 (25-4). С. 29—31.
5. Щеблыкин П. Н., Бородин Н. А., Боровиков Р. Г. К оценке величины динамической нагруженности лесохозяйственных машин от места установки их предохранительных устройств // Лесотехнический журнал. Воронеж, 2021. Т. 11, № 2 (42). С. 166—174.
6. Журавлев И. Н. Экспериментальные исследования точности срабатывания двухпоточного предохранительного устройства лесной фрезерной почвообрабатывающей машины //

Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. Воронеж, 2015. Т. 3, № 9-2 (20-2). С. 151—155.

7. Князев А. В., Бородин Н. А., Солёный В. А. Анализ конструкций и характеристик средств защиты ротационных лесохозяйственных машин от перегрузок // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. Воронеж, 2020. Т. 8, № 3 (50). С. 211—215.
8. Improvement of Gear Durability for an 86 kW Class Agricultural Tractor Transmission by Material Selection / S. M. Baek, S. Y. Baek, H. H. Jeon [et al.] // *Agriculture*. 2022. Vol. 12. 123 p. URL: <https://doi.org/10.3390/agriculture12020123>. Text. Image: electronic.
9. Contactless Mechanical Components: Gears, Torque Limiters and Bearings / J. L. Perez-Diaz, E. Diez-Jimenez, I. Valiente-Blanco [et al.] // *Machines*. 2014. Vol. 2 (312). URL: <https://doi.org/10.3390/machines2040312>. Text. Image: electronic.
10. Loveykin V. S., Rybalko V. M., Gudova A. V. Comparison of theoretical and experimental investigations of dynamics of start-up of screw conveyor mixer // *Scientific Bulletin of nubip of Ukraine. Series: agricultural machinery and energy*. 2013. Vol. 185 (3). 304 p.
11. Kondrakhin V. P., Demeshin D. A. Mathematical model of the dynamics of the drive of the machine when the safety clutch is triggered with the radial movement of the balls // *Bulletin of Donetsk National Technical University*. 2019. No. 2 (16). 211 p.

References

1. Plate cultivation units Hamal-Bomet. Available at: http://www.bomet.pl/oferta_tekst-77.html. Text. Image: electronic.
2. Operating manual KF 00.000 RE. Milling cultivators. Available at: <https://mct-trade.ru/downloads/pdf/KF.pdf>. Text. Image: electronic.
3. Sashko K. V., Romanyuk N. N., Borovets G. V., Dolonko N. V., German E. A., Nedvetsky P. A. BY Patent No. 20,090,960. 2009. 17 November.
4. Borodin N. A., Knyazev A. V., Maksimenkov A. I. Design schemes of opening safety couplings. *Actual Areas of Research of the XXI century: Theory and Practice*. Voronezh, 2016, no. 4 (25-4), pp. 29—31. (In Russ.)
5. Shcheblykin P. N., Borodin N. A., Borovikov R. G. To assess the magnitude of the dynamic loading of forestry machines from the place of installation of their safety devices. *Forestry Engineering Journal*. Voronezh, 2021, vol. 11, no. 2 (42), pp. 166—174. (In Russ.)
6. Zhuravlev I. N. Experimental studies of the accuracy of operation of a two-flow safety device of a forest milling tillage machine. *Actual Areas of Research of the XXI century: Theory and Practice*. Voronezh, 2015, vol. 3, no. 9-2 (20-2), pp. 151—155. (In Russ.)
7. Knyazev A. V., Borodin N. A., Salty V. A. Analysis of designs and characteristics of means of protection of rotary forestry machines from overloads. *Actual Areas of Research of the XXI century: Theory and Practice*. Voronezh, 2020, vol. 8, no. 3 (50), pp. 211—215. (In Russ.)
8. Baek S. M., Baek S. Y., Jeon H. H., Kim W. S., Kim Y. S., Kim N. H., Sim T., Kim H., Kim Y. J. Improvement of Gear Durability for an 86 kW Class Agricultural Tractor Transmission by Material Selection. *Agriculture*, 2022, vol. 12. 123 p. Available at: <https://doi.org/10.3390/agriculture12020123>. Text. Image: electronic.
9. Perez-Diaz J. L., Diez-Jimenez E., Valiente-Blanco I., Cristache C., Alvarez-Valenzuela M. A., Sanchez-Garcia-Casarrubios J. *Machines*, 2014, vol. 2 (312). Available at: <https://doi.org/10.3390/machines2040312>. Text. Image: electronic.
10. Loveykin V. S., Rybalko V. M., Gudova A. V. Comparison of theoretical and experimental investigations of dynamics of start-up of screw conveyor mixer. *Scientific Bulletin of nubip of Ukraine. Series: agricultural machinery and energy*, 2013, vol. 185 (3). 304 p.

11. Kondrakhin V. P., Demeshin D. A. Mathematical model of the dynamics of the drive of the machine when the safety clutch is triggered with the radial movement of the balls. *Bulletin of Donetsk National Technical University*, 2019, no. 2 (16). 211 p.

© Зимарин С. В., Четверикова И. В., Щеблыкин П. Н., Боровиков Р. Г., 2023

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6843

УДК 630.3

Обзор

Проблемы и перспективы получения и применения водорода

Беляев Сергей Васильевич

кандидат технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), sergbel2014@mail.ru

Левина Мария Сергеевна

*младший научный сотрудник, отдел комплексных научных исследований
ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (Российская Федерация), marilevine@ya.ru*

Получена: 1 марта 2023 / Принята: 27 апреля 2023 / Опубликовано: 9 мая 2023

Аннотация: Более строгие требования, предъявляемые к экологическим характеристикам к топливам и энергоустановкам в последние десятилетия, привели к масштабному поиску новых, экономически эффективных, экологически чистых энергоносителей. Повышенный спрос на энергоносители вызывает увеличение интереса к альтернативным источникам получения топлив, в т. ч. водорода, для генерации электроэнергии и использования на транспорте. В статье рассматриваются и анализируются вопросы производства и применения водорода, который в настоящее время во многих регионах мира считается приоритетным и перспективным энергоносителем. Рассматриваются основные пути и технологии получения водорода, его важнейшие физико-химические свойства, эксплуатационные и экологические характеристики. Можно предположить, что, используя относительно дешёвые ресурсы и технологии, водород и водородная энергетика могут получить импульс для широкой коммерциализации при благоприятных экономических условиях и составят конкуренцию ископаемым топливам в отдельных регионах Европы и мира. Потенциальные выгоды от расширения использования водорода и развития водородной экономики видятся, прежде всего, в оздоровлении окружающей среды; повышении энергетической безопасности ряда регионов и стран. Предполагаем, что в среднесрочной перспективе будущие технологические достижения повысят конкурентоспособность водорода. В настоящее время в европейских странах рассматривают увеличение объёмов производства

водорода как способ сокращения зависимости от импорта российской нефти и газа, а также уменьшения выбросов парниковых газов.

Ключевые слова: водород; топливные элементы; водородная энергетика; парниковые газы; технологии и ресурсы получения водорода

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6843

Review

Problems and prospects of hydrogen production and usage

Sergey Belyaev

*PhD in engineering, associate professor, Petrozavodsk State University
(Russian Federation), sergbel2014@mail.ru*

Maria Levina

*research assistant, Department of Multidisciplinary Scientific Research,
KarRC RAS (Russian Federation), marilevine@ya.ru*

Received: 1 March 2023 / Accepted: 27 April 2023 / Published: 9 May 2023

Abstract: More strict environmental performance requirements for fuels and power plants in recent decades have led to a large-scale search for new, cost-effective, environmentally friendly energy carriers. The increased demand for energy carriers has heightened interest in alternative sources of fuels including hydrogen to be used for electricity generation and in transportation business. The article discusses and analyzes the issues of production and use of hydrogen, which is currently considered a priority and promising energy carrier in many regions of the world. The main ways and technologies for producing hydrogen, its most important physical and chemical properties, operational and environmental characteristics are considered. It can be assumed that hydrogen and hydrogen energy may gain an impetus for wide commercialization under favorable economic conditions and compete with fossil fuels in certain regions of Europe and the world. The potential benefits from expanding the use of hydrogen and the development of hydrogen economy are seen primarily in healing the environment and enhancing the energy security of a number of regions and countries. It can be expected that future technological advances will promote the mid-term hydrogen competitiveness. Currently, European countries are considering increasing hydrogen production as a way to reduce dependence on Russian oil and gas import, as well as to reduce greenhouse gas emissions.

Keywords: hydrogen; fuel cell; hydrogen energy; greenhouse gases; technologies and resources for hydrogen production

1. Введение

В центре внимания многих исследований научных центров и компаний, прежде всего, стоит вопрос о влиянии новых технологий на уменьшение выбросов парниковых газов и глобальном потеплении.

Переход на водородное топливо неизбежно вызывает появление новых проблем. Водород представляет собой искусственный энергоноситель, который должен быть получен из существующих в природе веществ. Для понимания возможной роли водорода в процессе декарбонизации экономики необходимо провести анализ затрат энергии, требуемых на всех стадиях жизненного цикла водорода — от его производства до использования с целью получения электрической энергии или механической работы, необходимой для движения транспортных средств [8].

Существует несколько технологий производства водорода. Наиболее простая и удобная из них — электролиз воды. При этом получение водорода из воды электролизом — один из наиболее энергоёмких методов его получения. Если электричество используется от экологически чистого источника типа солнечной радиации, кинетической энергии ветра или энергии геотермальных источников, то электролиз можно считать чистым процессом, а получаемый водород — «зелёным». Но на данный момент водород, в основном, производится за счёт паровой конверсии метана. Этот отработанный в промышленных масштабах, дешёвый процесс ещё долго не будет иметь никаких конкурентов по себестоимости получаемого водорода (1—2 дол./кг в зависимости от цены газа и угля). Однако в процессе его создания образуется большое количество углекислого газа — 10 кг CO₂/кг H₂, поэтому многие эксперты считают, что такой, так называемый «серый», водород не может быть частью водородной экономики будущего. Возможным решением данной проблемы может служить применение технологий по улавливанию и хранению выделяемого углекислого газа, что, в свою очередь, приводит к удорожанию конечного продукта [5—8].

Рядом сдерживающих факторов для водородной экономики являются проблемы, возникающие при транспортировке и дальнейшем хранении водорода до передачи потребителю. Во всём мире ведутся разработки, чтобы увеличить экономическую эффективность и безопасность транспортировки водорода. Например, можно увеличить давление в трубопроводной системе, транспортировать водород в сжиженном состоянии, использовать суда — газовозы, железнодорожные и автомобильные цистерны [4], [9]. Перспективным способом представляется применение газопроводов. Водородные трубопроводы существуют сегодня, но они используются для того, чтобы транспортировать химический продукт от одного участка производства до другого. Энергия, требуемая для перемещения газа, в этом случае имеет вторичное значение, потому что расходы энергии на транспортировку — только часть полных издержек производства химического продукта и входит в его стоимость. Оценка энергии, требуемой для перекачки водорода по трубопроводам, может быть получена

на основании анализа работы трубопроводов природного газа, где накоплен достаточный опыт их создания и эксплуатации.

Хранение водорода также сопряжено с определёнными трудностями [6], [7]. На данный момент апробирован ряд способов, которые предполагают хранение в газообразном или в жидком виде, в связанном состоянии или в носителях, но все они имеют технические и экономические проблемы [11].

Нужно понимать, что фактическое потребление электрической энергии, для того чтобы получить, упаковать, передавать и хранить водород, может неожиданно легко превысить полезную энергию, получаемую за счёт его использования. В современной нефтегазовой экономике энергия, потерянная между производством горючего и его потреблением, составляет приблизительно 12 % для нефти и 5 % для газа. Очевидно, что необходимо оценить эти потери и для вариантов использования водорода в качестве горючего.

2. Материалы и методы

Объектом исследования являются материалы и информация статьи из открытых литературных источников по актуальным вопросам получения и применения водорода как перспективного энергоносителя, получаемого по современным и развивающимся технологиям.

В статье использованы такие методы исследования, как комплексный анализ и системный подход. Предлагается водородную энергетику рассматривать в качестве системы, которая динамично развивается с большими перспективами, а также с имеющимися противоречиями и рисками.

3. Результаты

Понятие водородной энергетики и экономики, рассматривающей водород в качестве перспективного коммерческого топлива, позволяющего частично или полностью заменить традиционные углеводороды, было введено ещё в конце прошлого века [19]. В последние годы этому процессу уделяется повышенное внимание, он по-прежнему вызывает неугасающий интерес. По некоторым оптимистическим прогнозам, водород может быть одним из перспективных топлив в XXI веке [2], [5], [9].

На рисунке 1 представлены основные виды топлив, активно используемых в разное время. Как видно из рисунка 1, концентрация водорода в топливах имеет тенденцию к увеличению. Насколько реален такой переход? Пока ответ на этот вопрос неоднозначен и требует более глубоких объективных и комплексных исследований, которые в настоящее время проводятся в большинстве развитых стран.

Водород — самый распространённый химический элемент во Вселенной, был открыт ещё в XVIII веке. Он не имеет цвета и запаха, не токсичен, легче воздуха и очень быстро рассеивается в атмосфере. При утечке водород почти мгновенно улетучивается [2].

Традиционные энергоносители, такие как бензин и нефть, являются достаточно токсичными для человека и живой природы, и ликвидация ущерба, причиняемого окружающей среде в аварийных ситуациях, сопровождающихся утечками нефтепродуктов, как правило, сопряжена с большими затратами.

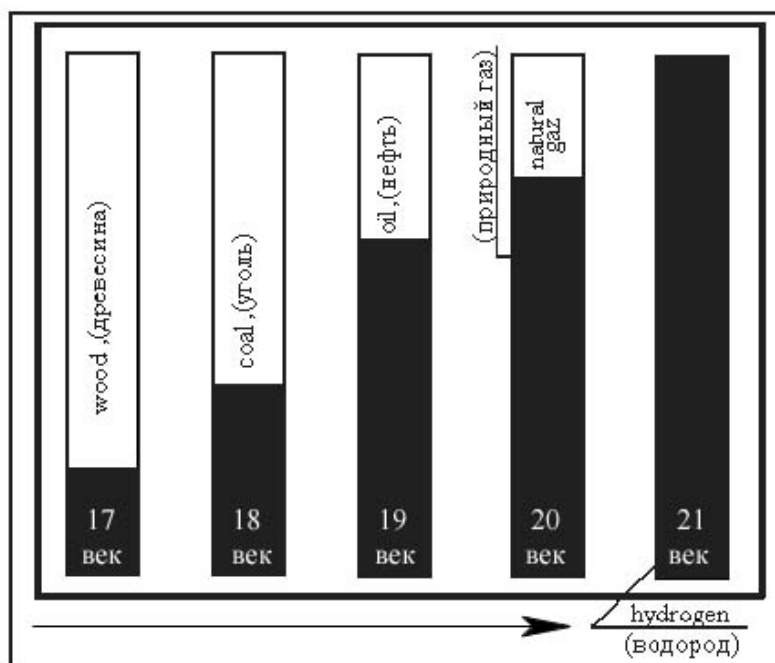


Рисунок 1. Содержание водорода в приоритетных топливах, используемых в разное время

Figure 1. Hydrogen content in priority fuels used at different times

В настоящее время водород выступает в качестве одного из промышленных газов и применяется в химической промышленности: в переработке нефти, производстве аммиака, метанола и стали. При этом энергетическое использование водорода реализуется лишь в объеме 1—2 % от общих объемов его потребления, и перспективы тесно связаны с развитием топливных элементов (ТЭ), лежащих в основе водородной энергетики.

Топливные элементы относятся к химическим источникам тока (ХИТ). Они осуществляют прямое превращение энергии топлива в электричество, минуя малоэффективные, идущие с большими потерями, процессы горения [1], [19]. Основа любого ХИТ — два электрода, соединённые электролитом. ТЭ состоит из анода, катода и электролита. На аноде окисляется, т. е. отдаёт электроны, восстановитель (топливо CO или H_2), свободные электроны с анода поступают во внешнюю цепь, а положительные ионы удерживаются на границе анод — электролит (CO^+ , H^+). С другого конца цепи электроны подходят к катоду, на котором идёт реакция восстановления (присоединение электронов окислителем O^{2-}). Затем ионы окислителя переносятся электролитом к катоду.

В ТЭ сведены вместе три фазы физико-химической системы:

- газ (топливо, окислитель);
- электролит (проводник ионов);
- металлический электрод (проводник электронов).

В ТЭ происходит преобразование энергии окислительно-восстановительной реакции в электрическую, причём процессы окисления и восстановления пространственно разделены электролитом [2]. Электроды и электролит в реакции не участвуют, но в реальных конструкциях со временем загрязняются примесями топлива.

Среди наиболее очевидных достоинств водородной энергии на базе топливных элементов (ТЭ) следует выделить[1]:

- минимальное влияние на загрязнение окружающей среды;
- технические преимущества;
- повышение энергетической безопасности;
- независимость от энергетических сетей (автономность);
- топливные элементы успешно заменяют батареи.

3.1. Влияние на окружающую среду

Преобразуя топливо через химическую реакцию прямо в энергию ТЭ, получают больше энергии по сравнению с обычными способами получения энергии через процессы сгорания. Прямой процесс получения энергии уменьшает расход и топлива, увеличивая эффективность от 30 до 90 % в зависимости от системы ТЭ и способов утилизации воды и тепла, образующихся при этом.

Минимальная эмиссия вредных веществ. При использовании водорода в качестве топлива в результате химической реакции выделяются вода, тепло и электроэнергия, а при любом самом совершенном сгорании обычных топлив образуются окислы углерода, азота, оксиды серы и другие продукты сгорания.

Уменьшение вредного влияния на окружающую среду, присущую добывающим отраслям промышленности. ТЭ позволяют избежать нарушения экосистемы, связанного с добычей ископаемых топлив из земли, т. к. водород при благоприятных условиях может быть получен из возобновляемых источников энергии. При утечке водорода его пары очень быстро улетучиваются, потому что он легче воздуха.

3.2. Технические достоинства топливных элементов

ТЭ могут работать на водороде, который получают из любого известного сегодня топлива (газ, спирт, бензин и т. д.).

Высокая энергетическая плотность. Мощность ТЭ обычно определяют в кВт/л. Этот показатель постоянно повышается, т. к. очень активно проводятся исследования технологии производства ТЭ.

Низкие рабочие температуры и давления. Температурный диапазон работы ТЭ лежит от 80 до 1000 °С и зависит от типа топливного элемента. Следует заметить, что температура сгорания в двигателе автомобиля может достигать 2300 °С.

Удобство в компоновке. ТЭ, обладающие минимальной шумностью и практически нулевой эмиссией вредных веществ, могут быть расположены в самых разных местах — как внутри системы, так и снаружи.

Потенциальная способность к увеличению эффективности в работе. Тепло, которое получается в результате химической реакции в ТЭ, может быть утилизировано для нагрева воды и помещений. В этом случае КПД (эффективность) теоретически может приблизиться к 90 %.

Высокая чувствительность к изменению нагрузки. Для получения дополнительной мощности при работе ТЭ необходимо больше подавать топлива в систему, т. е. это аналогично работе бензинового двигателя: нажимая на педаль газа, увеличиваем мощность автомобиля.

Техническая простота. ТЭ не включают никаких подвижных, сопряжённых деталей. Отсутствие любого вида движения позволяет получить простую конструкцию, с высокой степенью надёжности, спокойной работы и с меньшей вероятностью отказа.

3.3. Повышение энергетической безопасности

Водород, применяемый в ТЭ, может быть получен из местных источников топлива: природного газа, угля, при помощи электролиза воды и биомассы и других возобновляемых источников: ветровой энергии, фотоэлектричества и др.

Использование местных ресурсов уменьшает зависимость от поставщиков с других регионов и стран, повышает надёжность энергоснабжения.

Независимость от энергетических систем. Автономные системы с ТЭ позволяют получать потребителям стабильную электроэнергию, не опасаясь нарушения в работе электросетей по разным причинам (обледенение проводов, их обрыв и др.).

3.4. Применение и типы топливных элементов

Существует две сферы применения ТЭ: автономная и большая энергетика. Для автономного использования основными являются удельные характеристики и удобство эксплуатации. Для большой энергетики решающим фактором является экономичность. Кроме того, установки должны быть долговечными, не содержать дорогих материалов и использовать природное топливо при минимальных затратах на подготовку.

Наибольшие выгоды связаны с использованием ТЭ в автомобиле.

Основными областями использования автономных установок с ТЭ были военные и военно-морские применения. В конце 1960-х гг. объём исследований по ТЭ сократился, а после 1980-х гг. вновь возрос применительно к большой энергетике [2], [5]. В большой

энергетике очень перспективно использование ТЭ для крупномасштабного накопления энергии, например, получения водорода. Возобновляемые источники энергии (солнце и ветер) отличаются рассредоточенностью. Их активное использование, без которого в будущем не обойтись, немыслимо без ёмких аккумуляторов, запасующих энергию в той или иной форме.

Проблема накопления актуальна уже сегодня: суточные и недельные колебания нагрузки энергоносителей заметно снижают их эффективность и требуют маневренных мощностей. Один из вариантов электрохимического накопления энергии — это ТЭ в сочетании с электролизерами и газгольдерами.

При этом в химической промышленности процесс производства водорода, его упаковки и транспортировки успешно реализуется. Но этот водород — химическое вещество, а не товар-энергоноситель. В химической промышленности затраты на производство водорода, его транспортировку и др. входят в цену синтезируемых химических продуктов. Стоимость водорода является приемлемой, пока конечные продукты находят сбыт на рынке. Таким образом, сегодня использование водорода управляется экономическими законами, а не энергетическими и экологическими соображениями [3], [6].

Очевидно, что водород как потенциальный энергоноситель обладает определёнными физическими и экологическими преимуществами, и зародившийся мировой водородный рынок сможет конкурировать с рынком углеводородов [11], [19]. Фундаментальный вопрос о том, сколько энергии необходимо, чтобы использовать водородную экономику, должен быть обязательно изучен. Для этого необходимо проанализировать ключевые стадии жизненного цикла водорода как горючего: производство, упаковку (первичное хранение), транспортировку, хранение на заправочной (или раздаточной) станции и передачу элементного водорода потребителю и сравнить энергию, использованную на этих стадиях, с количеством энергии водорода, поставленного потребителю [10], [12].

Из водорода состоит большая часть видимой материи в нашей Вселенной. На Земле почти весь водород связан с кислородом, образуя воду, или с углеродом — органика и углеводороды, включая уголь, нефть и природный газ. Эти связи могут быть разрушены, чтобы сделать водород подходящим энергоносителем. Он должен быть отделён и доставлен до места выработки энергии. Генерация энергии происходит, когда водород вновь соединяется с кислородом либо путём сжигания, либо в ходе химической реакции водорода и кислорода, происходящей на топливном элементе катода. Процесс горения водорода обеспечивает тепловой энергией, в то время как реакции на топливном элементе дают как тепло, так и электричество.

Производство водорода требует энергии [8]. Способы получения водорода широко и давно известны, вот некоторые из них:

- получение из ископаемых топлив. В химической формуле любого топлива присутствует водород. Некоторые из топлив имеют очень высокое отношение водорода

к кислороду, и это делает их наилучшим кандидатом процесса добывания. Например, природный газ (метан);

- получение водорода из природного газа по технологии реформинга паром. Эффективность данного процесса достигает 70—90 %;

- получение водорода из воды методом электролиза. По сравнению с паровым реформингом электролиз — очень дорогой процесс получения водорода;

- получение водорода методом фотоэлектролиза, т. е. прямым преобразованием солнечной энергии в электрическую;

- получение водорода фотобиологическим методом. Данный процесс включает использование солнечной энергии, катализатора и технической системы. Специфические микроорганизмы, микробы, бактерии могут производить водород при определённых условиях;

- получение водорода пиролизом и газификацией биомассы и угля или другого органического топлива, в ходе которой водород выделяется в виде летучих фракций под воздействием тепла;

- биологические процессы с использованием живых организмов для разложения воды или органики.

Каталитическая реакция является преобладающим способом производства водорода на сегодняшний день, в то время как электролиз только набирает популярность. Остальные способы сейчас находятся на экспериментальной стадии.

Далёкие мечты, продвигаемые исследователями и сторонниками устойчивой энергетики, связаны с электролитическим производством водорода с помощью возобновляемых источников энергии.

Возобновляемые источники энергии (фотогальванические солнечные элементы, ветер, малая гидроэнергетика, геотермальная энергетика и даже энергия волн) — технологии, доступные сегодня и всё в большей степени используемые для производства энергии. Полученный водород может храниться и использоваться, по мере необходимости, для производства электроэнергии или непосредственно в качестве топлива. Стабильное получение и хранение водорода является основным фактором, чтобы возобновляемая энергетика стала экономически целесообразной [3], [9], [15].

Данный сценарий развития для электрических и транспортных систем, основанный на возобновляемом водороде, является весьма привлекательным. Кажется, что это решение для некоторых, самых актуальных проблем энергетики. Пока что такое развитие событий сталкивается с комплексом трудноразрешимых вопросов, и ответы на эти вопросы не менее сложны. Они сосредоточены вокруг реальности, где производство электроэнергии из возобновляемых источников теоретически не сокращено, но на практике преобладают серьёзные ограничения.

Центральный вопрос — как с максимальной выгодой использовать ограниченные электрогенерирующие источники с минимальными выбросами углекислого газа от сжигания

ископаемого топлива, который является главной причиной глобального потепления. Актуальным является также следующий вопрос: являются ли реально возобновляемые источники энергии лучшими кандидатами для получения водорода [4], [8], [11].

В основе данного анализа, главным образом, следует учитывать экономическую эффективность [8], [15]. Очевидно, что степень эффективности использования возобновляемых источников энергии определяет степень реализации экологических преимуществ при их использовании. Все энергосистемы функционируют с некоторым снижением КПД [15].

Количество энергии, которое, на самом деле, производится и используется, меньше количества энергии, что потенциально содержится в топливе, или количества энергии, которое могло бы быть выделено этим топливом. В известном смысле, это несправедливое соревнование, т. к. полученный водород из возобновляемых источников энергии всегда включает ступени преобразования, не предусмотренные традиционной энергосистемой. Например, сначала водород должен быть получен путём электролиза, а затем он должен быть введён в топливные элементы. Два процесса являются зеркальным отражением друг друга. От 10 до 30 % энергии теряется во время электролиза. Тогда лишь часть энергии, заключённой в водороде, превращается в электричество. Посчитать полный КПД несложно. Если при электролизе КПД может достигать 80 %, а топливного элемента 60 %, то на выходе общий КПД системы получается 48 %. Действующая энергосистема таким потерям не подвержена. Это хорошо понимают сторонники водородной экономики, и не только они.

Скромная эффективность получения водорода из возобновляемых источников энергии имеет экономическую важность, вот почему многие эксперты прогнозируют, что полученный из ископаемого топлива водород, вероятно, будет господствовать в ближайшие десятилетия. Сейчас примерно более 500 млрд м³ водорода производится ежегодно для самых разнообразных целей — от очистки масла до кулинарии, 96 % от этого объёма добывается из ископаемых, остальные 4 % получают путём электролиза. В ближайшие десятилетия конверсированный паром природный газ с целью получения водорода, возможно, сможет стать экономически более выгодным способом. Пока природный газ не станет более дорогостоящим и запасы его не пойдут на убыль, водород, добытый с помощью газификации угля, будет ожидать ждать своего часа. Уголь представляет примерно 90 % от мировых запасов традиционных ископаемых топлив [3], [4].

Вторая значительная перспектива использования водородной энергетики — хранение энергии, полученной от возобновляемых источников, дающих энергию скачкообразно; данный способ сможет соперничать с технологиями, включающими батареи, гидроаккумулирующие станции и сжатый воздух.

Между водородом и топливными элементами должно быть сделано важное разграничение. Зачастую они обсуждаются как единое целое. Но водород — это топливо, в то время как топливные элементы — устройство для преобразования энергии. Топливные элементы также являются высокоэффективным устройством для преобразования энергии

водорода. Топливные элементы могут работать в стационарном режиме, питая электрогенераторы, потенциально с большей эффективностью, чем центральные электростанции или другие небольшие технологические системы для распределения энергии.

Такие элементы можно использовать в качестве дополнительного источника, что обеспечит увеличение эффективности системы электроснабжения. Потери на линиях исключаются. Тепло, вырабатываемое топливными элементами, может быть направлено в систему отопления, вентиляции и кондиционирования зданий.

Очень важно придерживаться объективного подхода в анализе энергоэффективности, потому что он предлагает явные и простые способы иллюстрации требований и воздействия на окружающую среду различных путей энергоснабжения. Сравнение относительной эффективности водорода и электричества привносит ясность в суть дела, которую не дадут другие системы показателей [15]. Анализ КПД показывает, как много полезной энергии вырабатывается от одинаковых объёмов затраченной энергии. Время покажет, будет ли тот или иной способ энергоснабжения фактически реализован [8]. В то же время анализ КПД обеспечивает основу для определения того, какие пути являются наиболее перспективными для экологических выгод. Также более уместно при исследовании долгосрочных перспектив использовать анализ энергоэффективности, поскольку экономические прогнозы, как правило, в большей степени подвержены изменчивости и неопределённости [13], [17].

Электричество от возобновляемых источников может вырабатываться на тех же предприятиях, которые используют энергию сжигания ископаемых топлив, в то же время уменьшая выбросы парниковых газов. Но применение некоторых возобновляемых источников сможет уменьшить выбросы парниковых газов.

Тенденции в области технологий, экономики и роста рынка указывают на то, что возобновляемая энергетика в будущем станет более распространённой, но с течением некоторого времени, скорее всего, останется относительно ограниченным ресурсом. Но очевидно, что уже в наши дни прогнозируется увеличение спроса на энергию. Большинство генерируемой от возобновляемых источников энергии найдёт прямые рынки сбыта, и большая часть мира не будет испытывать переизбытка такой энергии в течение, как минимум, десятилетий. Таким образом, вопрос эффективности будет оставаться важным, даже несмотря на то, что возобновляемая энергетика влияет на окружающую среду, как утверждается в различных спорах о ветровых электростанциях. Эти воздействия подразумевают ограничения, которые будут продолжать делать эффективное использование возобновляемой энергетике жизненно важной задачей.

В то время как существует большой интерес к использованию водорода, можно надеяться, что будут активно обсуждаться вопросы энергетических альтернатив. Водород можно получать также электролизом воды, т. е. разложением её под воздействием электрического тока, получаемого от различных источников энергии. Для получения электрической энергии используются ветровой генератор, фотогальванические элементы, сеть переменного тока и энергия солнца, которые являются возобновляемыми источниками энергии. В дальнейшем

полученный водород поступает в системы хранения или транспортируется к потребителям [3], [4]. Как показано на рисунке 2, для получения водорода в данный момент существует множество различных путей добывания из ряда известных источников.

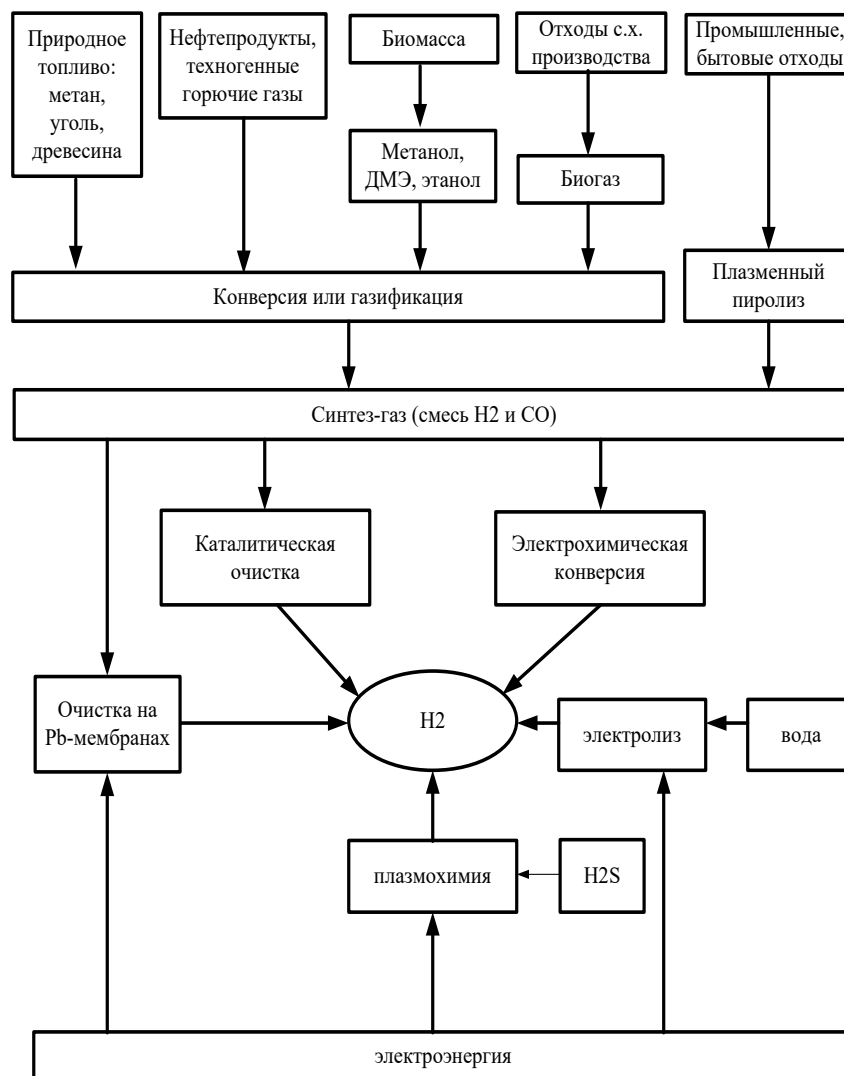


Рисунок 2. Возможные источники и пути получения водорода

Figure 2. Possible sources and ways of obtaining hydrogen

Один из его источников — природное топливо: метан, уголь, древесина, нефтепродукты, техногенные горючие газы. При взаимодействии топлива с парами воды или воздухом образуется синтез-газ — смесь CO и H₂. Из неё затем выделяется водород. Другой источник — отходы сельскохозяйственного производства, из которых получают биогаз, а затем — синтез-газ. Промышленно-бытовые отходы тоже используются для производства синтез-газа, что способствует одновременно и решению экологических проблем, поскольку отходов много и их нужно утилизировать. В конечном счёте, образуются углекислый газ,

водород и окись углерода. Дальше идёт каталитическая очистка, электрохимическая конверсия и т. д. Очень важным элементом при преобразовании газа, содержащего водород, является очистка газа на палладиевых мембранах. В результате получается чистый водород.

Безопасен ли водород?

Водород является энергоносителем. Он без цвета и не имеет запаха, легче воздуха и очень быстро рассеивается в атмосфере. Один килограмм водорода содержит такое же количество энергии, как 2,1 кг природного газа или 2,8 кг бензина.

Энергетическая плотность водорода составляет 2,36 кВт/л, природного газа — 5,8 кВт/л и бензина — 8,76 кВт/л. Эти факты позволяют сделать вывод о размерах ёмкости для хранения водорода и бензина, а также о мощности взрыва этих двух топлив.

Водород не токсичен. Бензин и нефть достаточно токсичны для человека и живой природы. При утечке водорода он почти мгновенно улетучивается, при потерях нефтепродуктов требуются большие затраты по ликвидации ущерба окружающей среде.

Для воспламенения водорода требуется его большая концентрация в воздухе по сравнению с другими топливами. Действительно, водород обладает широкими пределами воспламенения, нижний предел выше, чем, например, у бензина. Для бензина концентрация его паров в воздухе выше 1 % становится взрывоопасной, у водорода этот уровень составляет от 4 %. Поэтому риск взрыва меньше, чем у паров бензина. Однако, учитывая, что верхний предел воспламенения может быть и 74—75 %, очень сложно управлять процессом сгорания, например, в тепловых двигателях [2].

При соответствующей специальной подготовке обслуживающего персонала водород может быть ничуть не опаснее, чем многие другие виды топлива, широко применяемые в настоящее время [1]. Использование водорода и ТЭ открывает новые перспективы в автомобилестроении.

Концерн «БМВ» провёл серию тестов на безопасность водородных баков при авариях. Удалось создать такой топливный бак, который бы не взрывался ни при каких ситуациях и выдерживает нагрев до 1000 °С в течение 70 мин. Если же бак всё-таки разрушится, то водород будет гореть в воздухе. Бензин, разлившийся при аварии, горит на земле, сжигает всё вокруг. Пример такой аварии представлен на фото 1, где автомобиль заправлен водородом, и на фото 2, где машина заправлена бензином.

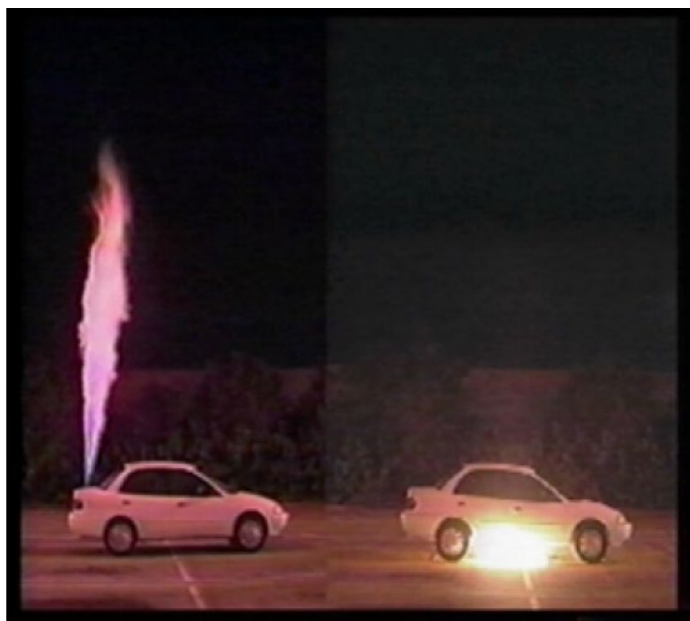


Фото 1. Начало аварии топливных баков. Время: 0 мин, 3 с. Происходит воспламенение обоих топлив

Photo 1. Onset of the fuel tanks crash, time is 0 minutes, 3 seconds. Ignition of both fuels occurs



Фото 2. Продолжение аварии. Время: 1 мин, 0 с. Водородный поток спадает, пожар транспортного средства на бензине начинает увеличиваться

Photo 2. Continuation of the accident. Time: 1 minute, 0 seconds. Hydrogen flow subsides, gasoline vehicle fire starts to increase

4. Обсуждение и заключение

В настоящее время максимальное внимание уделяется стадиям хранения и использования водорода, которые справедливо считаются критическими для развития водородной энергетики [14], [16], [18].

Водород, как уже отмечалось, должен быть получен, упакован, транспортирован и передан пользователю. Реализация этих процессов требует затрат энергии.

В современной нефтегазовой экономике энергия, потерянная между производством горючего и его потреблением, составляет приблизительно 12 % для нефти и 5 % для газа. Очевидно, что необходимо оценить эти потери и для вариантов использования водорода в качестве горючего.

Фактически значительное количество водорода уже производится, обрабатывается, транспортируется и используется в химической промышленности. Но этот водород — химическое вещество, а не товар-энергоноситель. В химической промышленности затраты на производство водорода, его транспортировку и др. входят в цену синтезируемых химических продуктов. Стоимость водорода является приемлемой, пока конечные продукты находят сбыт на рынке. Таким образом, сегодня использование водорода управляется экономическими законами, а не энергетическими и экологическими соображениями [3], [9], [15]. Однако если водород должен использоваться как энергоноситель, энергетические и экологические проблемы нужно учитывать наравне с экономическими.

Необходимо иметь в виду, что водород — синтетический энергоноситель. Он только переносит энергию, сгенерированную другими процессами. Например, как уже отмечалось, водород может быть произведён с помощью электричества электролизом воды. Далее высококачественная (в термодинамическом смысле) электрическая энергия должна использоваться для сжатия или сжижения водорода, обеспечения транспортировки и хранения его у потребителя. Во многих случаях на стадии использования водорода в электрохимических генераторах, несмотря на их высокий КПД, не удаётся скомпенсировать все эти потери. Например, в стационарных приложениях водород, получаемый электролизом, не смог бы конкурировать с электричеством сети, которое могло быть распределено непосредственно пользователям с намного меньшими потерями первичной энергии. Очевидно, что стоимость водорода должна быть как можно более низкой. Однако этого недостаточно. Водородная экономика может иметь будущее только в том случае, если водород сможет конкурировать с традиционными энергоносителями [9], [13].

Существующая инфраструктура может обработать почти любой синтетический (жидкий) углеводород, в то время как водород требует полностью новой инфраструктурной сети. Переход к элементной водородной экономике затронул бы общую поставку энергии и его распределение потребителю. Фундаментальный вопрос о том, сколько энергии необходимо, чтобы развивать водородную экономику, должен быть обязательно изучен. Для этого необходимо проанализировать ключевые стадии жизненного цикла водорода как горючего:

производство, упаковку (первичное хранение), транспортировку, хранение на заправочной (или раздаточной) станции и передачу элементного водорода потребителю, а также сравнить энергию, использованную на этих стадиях, с количеством энергии водорода, поставленного потребителю [14], [17].

Список литературы

1. *Беляев С. В., Давыдов Г. А.* Проблемы и перспективы применения водорода в тепловых двигателях // Инженерный вестник Дона: Электронный научный журнал. 2019. № 8. С. 1—10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N8y2019/6123. Текст: электронный.
2. *Беляев С. В.* Топлива для современных и перспективных автомобилей. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2005. 236 с.
3. *Боброва В. В., Борисюк Н. К., Кирхмеев Л. В.* Водородная экономика — возможности и перспективы // Вестник Самарского университета. Экономика и управление. 2021. Т. 13, № 1. С. 7—16.
4. *Козлов С. И., Фатеев В. Н.* Водородная энергетика: современное состояние, проблемы, перспективы. М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2009. 520 с.
5. *Коровин Н. В.* Топливные элементы и электрохимические установки: состояние развития и проблемы // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology, ISJAE. 2004. № 10 (18). С. 9—14.
6. Проблемы аккумулирования и хранения водорода / В. Н. Фатеев, О. К. Алексеева, С. В. Коробцев [и др.] // Chemical problems. 2018. No. 4 (16). P. 453—479.
7. *Barthelemy H., Weber M., Barbier F.* Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives // Int. Journal Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42. P. 7254—7262.
8. *Bossel U., Eliasson B., Taylor G.* The Future of the Hydrogen Economy. Bright Right or Bleak, 2004.
9. The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R & D Needs, Committee on Alternatives and Strategies for Future Hydrogen Production and Use, National Academy of Engineering, National Academies Press. URL: <http://www.nap.edu/books/0309091632/html/2004>.
10. *Carlson E. J.* Cost Analyses of Fuel Cell Stack/Systems // Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies. Cambridge, 2003. Progress Report.
11. Center for Energy and Climate Solutions. Hydrogen and Fuel Cells: A Technology and Policy Review. Prepared for the National Commission on Energy Policy. October 2003.
12. *Lipman T. E.* What Will Power the Hydrogen Economy? Present and Future of Hydrogen Energy. An alysis and Report Prepared for The Natural Resources defense Council. 2004. 74 p.
13. *Lightner V.* Hydrogen Fuel Cell and Infrastructure Technologies Program. Office of Energy Efficiency and renewable Energy, US Department of Energy. Fuel Cell seminar, 2005.
14. *Lishuai Xie, Jinshan Li, Tiebang Zhang.* Microstructure and hydrogen storage properties of Mg—Ni—Ce alloys with a long-period ordered phase // Journal Power Sources. 2017. Vol. 338. P. 91—102.
15. Cost of Some Hydrogen Fuel Infrastructure Options / M. Mintz, S. Folga, J. Molburg [et al.]. Argonne, IL: Argonne National Laboratory, 2002.
16. Complex hydrides for hydrogen storage — new perspectives / B. L. Morten [et al.] // Materials Today. 2014. Vol. 17. P. 122—128.

17. *Spreng D T.* Net-Energy Analysis and the Energy Requirements of Energy Systems. New York: Praeger, 1988.
18. *Todorovic R.* Hydrogen storage technologies for transportation // Application Journal of Undergraduate Research. 2015. Vol. 5, no. 1. P. 56—59.
19. United States Department of Energy. Hydrogen, Fuel Cells and Infrastructure Technologies Program.

References

1. Belyaev S. V., Davydkov G. A Problems and prospects for the use of hydrogen in thermal engines. *Engineering Bulletin of the Don: Electronic scientific journal*, 2019, no. 8, pp. 1—10. Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N8y2019/6123. Text. Image: electronic. (In Russ.)
2. Belyaev S. V. *Fuels for modern and advanced vehicles*. Petrozavodsk, Publishing house PetrSU, 2005. 236 p. (In Russ.)
3. Bobrova V. V., Borisyuk N. K., Kirkhmeer L. V. Hydrogen economy — opportunities and prospects. *Bulletin of the Samara University. Economics and Management*, 2021, vol. 13, no. 1, pp. 7—16. (In Russ.)
4. Kozlov S. I., Fateev V. N. Hydrogen energy: current state, problems, prospects. Moscow, Gazprom VNIIGAZ, 2009. 520 p. (In Russ.)
5. Korovin N. V. Fuel Cells and Electrochemical Plants: State of Development and Problems. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology, ISJAE*, 2004, no. 10 (18), pp. 9—14. (In Russ.)
6. Fateev V. N., Alekseev O. K., Korobtsev S. V., Seregin E. A., Fateeva T. V., Grigoriev A. S., Aliev A. Sh. Problems of accumulation and storage of hydrogen. *Chemical problems*, 2018, no. 4 (16), pp. 453—479 (In Russ.)
7. Barthelemy H., Weber M., Barbier F. Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives. *Int. Journal Hydrogen Energy*, 2017, vol. 42, pp. 7254—7262.
8. Bossel U., Eliasson B., Taylor G. *The Future of the Hydrogen Economy*. Bright Right or Bleak, 2004.
9. The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R & D Needs, Committee on Alternatives and Strategies for Future Hydrogen Production and Use, National Academy of Engineering, National Academies Press. URL: <http://www.nap.edu/books/0309091632/html/2004>.
10. Carlson E. J. Cost Analyses of Fuel Cell Stack/Systems. *Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies*. Cambridge, 2003. Progress Report.
11. Center for Energy and Climate Solutions. Hydrogen and Fuel Cells: A Technology and Policy Review. Prepared for the National Commission on Energy Policy. October 2003.
12. Lipman T. E. *What Will Power the Hydrogen Economy? Present and Future of Hydrogen Energy. An alysis and Report Prepared for The Natural Resources defense Council*. 2004. 74 p.
13. Lightner V. *Hydrogen Fuel Cell and Infrastructure Technologies Program*. Office of Energy Efficiency and renewable Energy, US Department of Energy. Fuel Cell seminar, 2005.
14. Lishuai Xie, Jinshan Li, Tiebang Zhang. Microstructure and hydrogen storage properties of Mg—Ni—Ce alloys with a long-period ordered phase. *Journal Power Sources*, 2017, vol. 338, pp. 91—102.
15. Mintz M., Folga S., Molburg J., Gillette J. *Cost of Some Hydrogen Fuel Infrastructure Options*. Argonne, IL: Argonne National Laboratory, 2002.
16. Morten B. L., Lars H. J., Young-Su Lee, Young Whan Cho. Complex hydrides for hydrogen storage — new perspectives. *Materials Today*, 2014, vol. 17, pp. 122—128.

17. Spreng Daniel T. *Net-Energy Analysis and the Energy Requirements of Energy Systems*. New York, Praeger, 1988.
18. Todorovic R. Hydrogen storage technologies for transportation. *Application Journal of Undergraduate Research*. 2015, vol. 5, no.1, pp. 56—59.
19. United States Department of Energy. Hydrogen, Fuel Cells and Infrastructure Technologies Program.

© Беляев С. В., Левина М. С., 2023

УДК 630.376:629.733.5

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6983

Статья

Методика расчёта экономической эффективности использования аэростатических летательных аппаратов на лесотранспортных операциях

Абузов Александр Викторович

доктор технических наук, профессор, Тихоокеанский государственный университет (Российская Федерация), 006195@pnu.edu.ru

Григорьев Игорь Владиславович

доктор технических наук, профессор, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), silver73@inboxl.ru

Абузов Ярослав Александрович

студент, Национальный исследовательский университет ИТМО (Российская Федерация), yarusking@mail.ru

Каляшов Виталий Анатольевич

кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Российская Федерация), vit832@yandex.ru

Григорьева Ольга Ивановна

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

Получена: 2 апреля 2023 / Принята: 12 мая 2023 / Опубликовано: 16 мая 2023

Аннотация: В статье уделяется внимание проблемам транспортного освоения удалённых, труднодоступных лесных территорий, решение которых особенно актуально в связи со значительным истощением запасов леса в хорошо освоенных эксплуатационных лесных массивах и, возможно, за счёт использования аэростатических летательных аппаратов. Представлена методика расчёта экономической эффективности использования дирижаблей на транспортно-грузовых операциях, которая позволяет определить показатели себестоимости лётного часа с использованием оценки абсолютной и сравнительной эффективности. Особое внимание уделяется срокам окупаемости

полнокомплектного дирижабельного парка с учётом полного «жизненного» цикла летательных аппаратов и наземной инфраструктуры обслуживания. Приведены принципы сравнения эксплуатационных возможностей дирижаблей с другими видами транспорта, где наиболее важным показателем являются затраты на горюче-смазочные материалы, плановые техобслуживания и ремонт корпуса, а также силовых установок. Предложенная методика является базовой для более развёрнутых расчётов под конкретные случаи и условия эксплуатации аэростатических летательных аппаратов с учётом их лётно-технических характеристик. По этой методике также можно сравнивать себестоимости лётного часа разных дирижаблей, а также дирижаблей с самолётами и вертолётами.

Ключевые слова: дирижабли; себестоимость лётного часа; экономическая эффективность; аэростатические летательные аппараты

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6983

Article

Methodology for calculating the economic efficiency of aerostatic aircraft in forest transport operations

Alexander Abuzov

*D. Sc. in engineering, professor, Pacific State University (Russian Federation),
006195@pnu.edu.ru*

Igor Grigorev

*D. Sc. in engineering, professor, Arctic State Agrotechnological University
(Russian Federation), silver73@inbox.ru*

Yaroslav Arbuzov

Student, National Research University ITMO (Russian Federation), yarusking@mail.ru

Vitalij Kalyashov

*Ph. D. in engineering, associate professor, Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering (Russian Federation), vit832@yandex.ru*

Olga Grigoreva

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

Received: 2 April 2023 / Accepted: 12 May 2023 / Published: 16 May 2023

Abstract: The article deals with the problems of transportation development in remote hard-to-reach forest areas; their solution is especially relevant due to the significant depletion of forest reserves in well-developed operational forests. These problems could be solved by aerostatic aircraft exploitation. The author suggests a methodology for calculating the economic efficiency of airships utilization in transportation and cargo operations, which allows determining the cost of a flight hour by assessing absolute and relative efficiency. Particular attention is paid to the payback period of a complete airship fleet exploitation taking into account the full lifecycle of aircraft and ground service infrastructure. The principles of comparing the operational capabilities of airships with other modes of transport are given, the most important indicators being the costs of fuel and lubricants, scheduled maintenance, hull repair and propelling plants. The proposed methodology is the basis for more detailed calculations for specific cases and operating conditions of aerostatic aircraft, taking into account their flight

characteristics. According to this method, it is also possible to compare the cost of flight hours of different airships against those of airplanes and helicopters.

Keywords: airships; cost of flight hours; economic efficiency; aerostatic aircraft

1. Введение

Транспортная составляющая является базовым критерием, оказывающим одно из ключевых влияний на эффективность, а чаще и на целесообразность освоения труднодоступных лесных территорий [1]. В условиях горной местности со сложным мозаичным рельефом трудоёмкость и объём строительно-дорожных и лесотранспортных работ с использованием наземного транспорта часто становятся экономически не выгодны, что приводит к сдерживанию по освоению расчётной лесосеки и, как следствие, к снижению общей рентабельности лесопромышленного комплекса [2].

Весьма важным моментом освоения лесов на склонах являются экологические последствия воздействия движителей машин на почвогрунты, поскольку леса на склонах относятся к особо ранимым в экологическом плане [3—5]. Кроме этого, при работе на склонах возникают дополнительные и весьма существенные опасности для персонала [6—8]. Также отдельную проблему составляет строительство дорожной сети в рассматриваемых условиях [9], [10].

Проведя анализ ряда научно-исследовательских и прикладных работ, а также отчётов проводимых экспериментов в области новых видов грузового транспорта для лесного комплекса, можно констатировать, что комплексными технологиями, способными совмещать как транспортировку заготовленного леса, рабочий персонал, лесозаготовительную технику, а также выполнять контроль и мониторинг удалённых лесных территорий, могут являться аэростатические летательные аппараты, в частности, грузовые и гибридные дирижабли.

Аэростатический принцип создания подъёмной силы имеет ряд неоспоримых и важнейших достоинств. Этот вид воздушного транспорта обладает целым комплексом присущих только ему свойств, которые обеспечивают большую грузоподъёмность, дальность и продолжительность полёта, вертикальный взлёт и посадку, возможность транспортировки неделимых крупногабаритных грузов, монтажных работ в режиме длительного зависания, безопасность эксплуатации при отказе силовой установки или системы управления, относительно малые расходы топлива, незначительное воздействие на окружающую среду. Однако в силу не масштабного, а лишь экспериментального использования данного вида транспорта на грузовых операциях требуется более детальное исследование его экономических показателей [11—13].

2. Постановка проблемы

Экономическая эффективность любого вида транспорта имеет два принципиальных аспекта: стоимость самого транспортного средства, которая включает себестоимость выполняемых работ по созданию и эксплуатации изделия, и также экономический эффект, получаемый или предполагаемый получить в ближайшей перспективе от применения данного вида транспорта [14]. Ряд исследований, как теоретических, так

и экспериментально-прикладных, доказывают, что аэростатические летательные аппараты могут быть эффективным транспортным средством как по одному, так и по второму аспекту эффективности (рисунок 1).

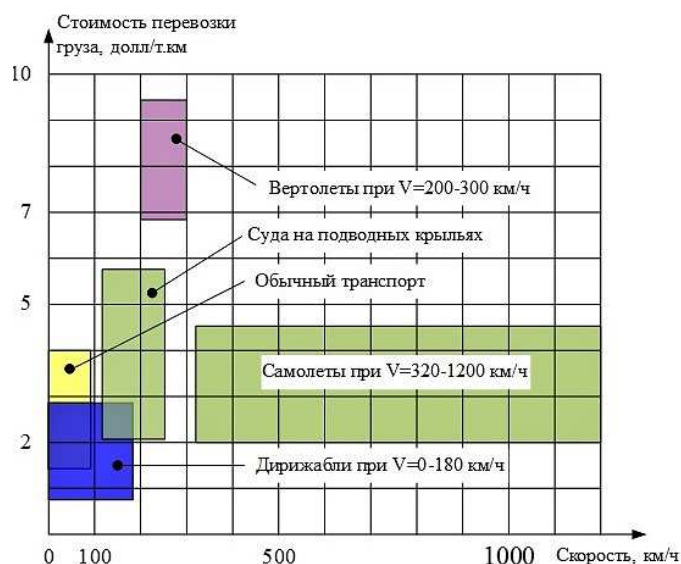


Рисунок 1. Зависимость стоимости перевозки груза от скорости передвижения различных видов транспорта

Figure 1. The dependence of cargo transportation cost on the speed of movement of various types of transport

У грузовых дирижаблей нового поколения значительно снижается себестоимость эксплуатации, поскольку их жёсткая оболочка в сочетании с правильной аэродинамической формой позволяет осуществлять стоянки без защитных эллингов, непосредственно под открытым небом [15]. Специально разработанный метод скоростного амортизированного причаливания с последующей автоматической швартовкой на поворотную площадку причального сооружения позволяет исключить сложный и трудоёмкий процесс швартовки с участием многочисленной наземной команды.

Однако самым важным аспектом, влияющим на себестоимость эксплуатации, конечно, являются лётно-технические характеристики современного дирижабля, сочетание которых позволит в будущем достичь максимального экономического эффекта.

К основным лётно-техническим характеристикам аэростатических летательных аппаратов можно отнести [16]:

- весовые характеристики (взлётный вес, весовая отдача, полезная нагрузка, коммерческая загрузка и др.);
- скоростные характеристики (максимальная и крейсерская скорости полёта);
- мощностные характеристики (потребная и максимальная мощность);

- дальность и продолжительность полёта (автономия дирижабля — время полёта дирижабля без посадки и без возобновления запасов топлива);
- геометрические размеры дирижабля (длина, максимальный диаметр-мидель, удлинение корпуса, коэффициент полноты и др.);
- эксплуатационная перегрузка.

Отечественные исследования показали, что годовая производительность дирижаблей выше, чем аналогичных по грузоподъёмности вертолёт, начиная с 5 т. Значения приведённых затрат при использовании дирижабля при одинаковой дальности полёта по сравнению с вертолёт практически в 2 раза меньше (рисунок 2).

Можно отметить, что аэростатические летательные аппараты имеют значительно бóльшую, по сравнению со всеми воздушными транспортными средствами, удельную грузоподъёмность (отношение веса перевозимого ими груза к его полётному весу). В этом смысле грузовой дирижабль уступает только аэростатно-канатным системам, однако они имеют ограниченную область применения, с точки зрения разового транспортного охвата лесной территории. Также современные дирижабли обладают высокой экономичностью по такому важному критерию, как транспортная производительность, — это произведение веса перевозимого груза на дальность транспортировки — и имеют значительно более низкую, чем вертолёты, стоимость конструкции на единицу транспортной производительности за счёт большой грузоподъёмности и сравнительно малого расхода топлива [19].

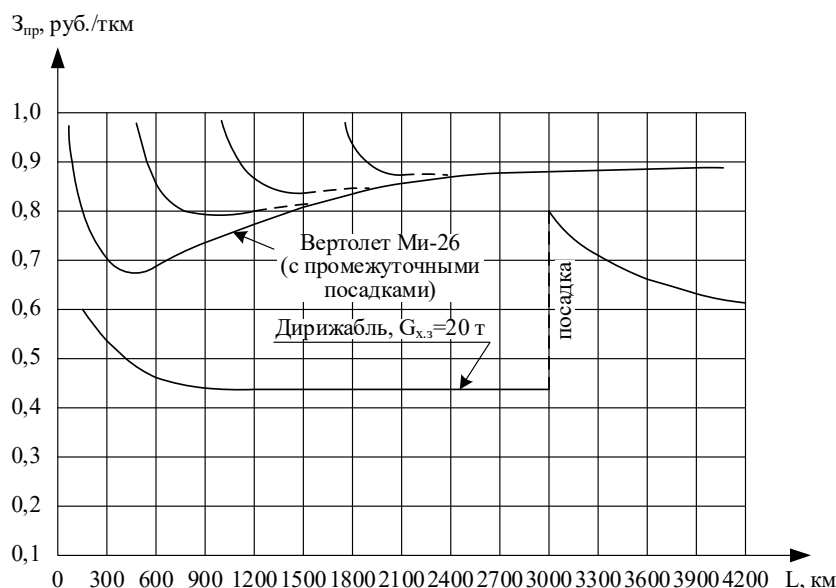


Рисунок 2. Сравнение значений приведённых затрат в зависимости от расстояния транспортировки для дирижабля (грузоподъёмность 20 т) и вертолёта Ми-26

Figure 2. Comparison of reduced expenditures values depending on the transportation distance for an airship (carrying capacity 20 tons) and a Mi-26 helicopter

Приведём критерии оценки экономической эффективности дирижаблей.

Первым этапом требуется дать оценку эффективности капиталовложения, которая подразделяется на абсолютную и сравнительную экономическую эффективность [17], [18].

Оценка абсолютной экономической эффективности проводится с целью определения общего эффекта от внедрения и применения нового оборудования в технологическом процессе, основным критерием которой является срок окупаемости полных капитальных вложений:

$$T_{ок} = \frac{K}{\Pi} \leq T_{н}, \quad (1)$$

где K — полные капитальные вложения на создание дирижабельного парка, Π — среднегодовая прибыль от эксплуатации дирижаблей в расчётный период времени, $T_{н}$ — нормативный срок окупаемости капитальных вложений (в соответствии с межотраслевой $T_{н} = 8$ лет).

Срок окупаемости полных капитальных вложений парка грузовых дирижаблей для вывозки древесины обычно сопоставляется с нормативным. В том случае, если $T_{ок} \leq T_{н}$, то тогда создание и применение грузовых дирижаблей на лесозаготовках экономически оправдано. В противном же случае это нецелесообразно.

Полные капитальные вложения на создание грузовых дирижаблей включают прямые K_0 и сопряжённые капитальные вложения:

$$K = K_0' + \sum_{i=1}^n N_{д1} A_{ij} K_{уді}, \quad (2)$$

где K_0' — капиталовложения на нулевой стадии «жизненного цикла», A_{ij} — коэффициент полных затрат, сопряжённых со строительством дирижаблей i -й отрасли производственных направлений (авиация), $K_{уді}$ — удельные капитальные вложения в сопряжённые отрасли, руб./ед. продукции; $N_{д1}$ — величина расчётного парка дирижаблей по каждому j -му типу дирижабля.

Учитывая фактор разновременности осуществления капитальных вложений, их величину необходимо привести к единому расчётному моменту времени с помощью коэффициента дисконтирования (приведения затрат во времени) $B_{пр}$:

$$B_{пр} = (1 + E_{нп})^{\Delta t}, \quad (3)$$

где $E_{нп}$ — норма дисконтирования (норматив для приведения разновременных затрат), $E_{нп} = 0,08$; Δt — время приведения затрат на i -й стадии:

$$\Delta t = \tau - \tau_0;$$

τ — текущее время вложения средств, τ_0 — момент приведения;

$$K_o = \sum_{t_2^H}^{t_3^H} \sum_{t_2^H}^{t_3^H} K_{o't_2} (1 + E_{\text{нп}})^{t_3 - t_2} \cdot \frac{Q_{t_3}}{Q_{T_3}}, \quad (4)$$

где t_2 — календарный год осуществления капиталовложений; t_3 — календарный год получения эффекта от эксплуатации; Н, К соответственно означают начало и конец капитального вложения; Q_{t_3} — объём работ в t_3 -й год эксплуатации, Q_{T_3} — объём работ за весь цикл эксплуатации T_3 ; $K_{o'}$ — капиталовложения на нулевой стадии «жизненного цикла»: НИИ, ОКБ, производство, ...; $K_{o't_2}$ — капиталовложения в t_2 только t_2 год на стадии o' .

В общем случае размер прибыли

$$\Pi = \Pi - C, \quad (5)$$

где Π — цена годового объёма перевозок (по действующим тарифам для воздушного транспорта), C — себестоимость годового объёма перевозок;

$$\Pi = SQ, \quad (6)$$

где S — тариф перевозки единицы груза, Q — годовой объём работ.

$$C = C_{1\tau} H_{\text{год}} N, \quad (7)$$

где $C_{1\tau}$ — себестоимость лётного часа, $H_{\text{год}}$ — потребный годовой налёт, ч, N — размер парка грузовых дирижаблей.

Учитывая неравноценность эффекта, получаемого от эксплуатации дирижаблей в разное время, величина прибыли также должна быть скорректирована на коэффициент приведения:

$$B_{\text{пр}} = (1 + E_{\text{нп}})^{\Delta t}. \quad (8)$$

С учётом разновременности получения доходов получим:

$$\Pi = \frac{SQ - C_{1\tau} H_{\text{год}} N}{(1 + E_{\text{нп}})^{t_3 - t_2^H}} \quad (9)$$

Окончательная формула срока окупаемости будет иметь вид:

$$T_{\text{ок}} = \frac{\sum_{t_2^H}^{t_3^H} K_{t_2} (1 + E_{\text{нп}})^{t_3 - t_2} \frac{Q_{t_2}}{Q_{T_3}}}{\sum_{t_2^H}^{t_3^H} \frac{SQ - C_{1\tau} H_{\text{год}} N}{(1 + E_{\text{нп}})^{t_3 - t_2^H}}} \quad (10)$$

Сравнительную эффективность будем оценивать при сопоставлении дирижабля с другими видами транспорта.

При выборе наилучшего варианта типа дирижабля и при сравнении его с конкурирующими видами лесного транспорта наиболее эффективным считается тот,

который характеризуется минимальными приведёнными издержками при выполнении заданного объёма работ.

Критерием сравнительной экономической эффективности является стоимость транспортной операции \bar{C} :

$$\bar{C} = C + E_n K \rightarrow \min, \quad (11)$$

где C — себестоимость транспортной операции дирижабля за один цикл эксплуатации, руб./год; E_n — нормативный коэффициент сравнительной экономической эффективности; K — капиталовложения, руб.

В соответствии с типовой методикой определения экономической эффективности капитальных вложений величина E_n в целом по народному хозяйству устанавливается на уровне не ниже 0,12, т. е. [16]:

$$E_n = 0,12.$$

3. Результаты

За наиболее эффективный принимается вариант, при котором транспортные операции выполняются с наименьшей величиной затрат.

Расчёт абсолютной и сравнительной экономической эффективности проводится при учёте ряда операционных, проектных и экономических показателей, находящихся в области допустимых значений (дисциплинирующие условия).

В соответствии с существующей практикой учёта эксплуатационных расходов по каждому типу летательных аппаратов при расчёте лётного часа дирижабля учитываются затраты на ГСМ, газ-носитель, зарплату лётно-подъёмного состава, амортизационные отчисления, техобслуживание, прочие прямые и косвенные расходы.

Принятая группировка эксплуатационных затрат позволяет при экономической оценке различных типов дирижаблей учесть их специфические отличия от лётно-технических характеристик, условий производства и эксплуатации. Кроме того, такая группировка эксплуатационных расходов обеспечивает возможность выполнения сравнительной оценки дирижабля с конкурирующими летательными аппаратами [16].

Из опыта эксплуатации летательных аппаратов с газотурбинными турбовинтовыми двигателями установлено, что часовые затраты на ГСМ для турбовинтовых двигателей при $v_{кр} < 600$ км/ч могут определяться по уравнению

$$C_{ГСМ} = 13,18 (V_{кр} G_0)^{0,72} L^{-0,07}, \quad (12)$$

где $V_{кр} G_0$ — техническая производительность, тыс.ткм/ч; G_0 — взлётный вес, т; L — предельная дальность беспосадочного полёта при максимальной коммерческой нагрузке ($G_{комм}^{max}$), км.

Наиболее чувствительной шкалой затрат является часовой расход несущего газа (гелия), который можно определить по формуле

$$C_{\text{нап}} = \frac{C_r}{\tau^r} = \frac{V_6 C_{1r} K_p^r}{\tau^r \cdot 100} \quad (13)$$

где C_r — стоимость одного объёма газа-наполнителя, руб.; V_6 — объём баллонов, м³; C_{1r} — стоимость 1 м³ газа; K_p^r — годовой расход гелия, процент от объёма; τ^r — годовой налёт, ч.

Амортизационные отчисления необходимы для компенсации следующих издержек при эксплуатации:

- реновация планера с готовыми изделиями и двигателями;
- затраты на капремонты оболочки и кабины пилотов с входящими готовыми изделиями и двигателями;
- величина реновации на один лётный час определяется как отношение оптовой цены за вычетом остаточной стоимости к амортизационному ресурсу дирижабля (двигателя) согласно уравнению

$$C^p = C^{pд} + C^{pдв} = \frac{C_d(1 - 0,05) + C_{бч}(1 - 0,05) \left(\frac{t_d}{t_{бч}} \right)}{\tau_d} + \frac{C_{дв}(1 - 0,04)}{\tau_{дв}} m_{дв}, \quad (14)$$

где $C^{pд}$ — часовые затраты на реновацию планера с оборудованием, руб.; $C^{pдв}$ — часовые затраты на реновацию двигателей, руб.; C_d — оптовая цена дирижабля без баллонной части, руб.; $C_{бч}$ — оптовая цена баллонной части, руб.; t_d — календарный срок службы дирижабля, лет; $t_{бч}$ — календарный срок службы баллонной части, лет; τ_d — амортизационный ресурс планера дирижабля, ч; $\tau_{дв}$ — амортизационный ресурс двигателей, ч; $m_{дв}$ — количество двигателей, шт.

На основании данных ФГУП ГосНИИГА методом регрессивного анализа были получены следующие закономерности изменения оптовой цены планера и двигателя. Оптовая цена корпуса дирижабля без газа:

$$C_{дп} = 1,486 \cdot N_n^{d-0,33} V_{бч}^{0,04} G_n^{0,373}, \quad (15)$$

Оптовая цена корпуса дирижабля с газом:

$$C_d = 0,7577 \cdot N_n^{d-0,2587} V_{бч}^{-0,23} G_{взл}^{0,267}. \quad (16)$$

Оптовая цена двигателей:

$$C_{дв} = 30 N_{\text{max}}^{1,04} N_n^{дв-0,15} (1 + 4 n_{оп}^{дв0,65} N_n^{дв-0,85}), \quad (17)$$

где G_n — вес пустого дирижабля, т; $G_{взл}$ — взлётный вес, т; $N_n^d, N_n^{дв}$ — размер парка дирижаблей и двигателей шт.; N_{max} — максимальная мощность двигателя, э. л. с.; $n_{оп}^{дв}$ — размер опытной партии двигателей, шт. (30 + 150 шт.).

Отчисления на капремонты, приходящиеся на 1 л. с.:

$$C^{кр} = C^{крд} + C^{крдв} = \frac{C_d K_{кр}^д n_{кр}^д}{\tau_d} + \frac{C_{дв} K_{кр}^{дв} n_{кр}^{дв}}{\tau_{дв}} m_{дв}, \quad (18)$$

где $C^{крд}$ — затраты на капремонт дирижабля, приходящиеся на один лётный час;
 $C^{крдв}$ — затраты на капремонт двигателя, приходящиеся на один лётный час;
 $C_d, C_{дв}$ — оптовая цена дирижабля и двигателя; $n_{кр}^д, n_{кр}^{дв}$ — число капремонтов дирижабля и двигателей за амортизационный ресурс; $\tau_d, \tau_{дв}$ — амортизационный ресурс дирижабля и двигателя; $K_{кр}^д, K_{кр}^{дв}$ — норма амортизации на капремонт дирижабля и двигателей;
 $m_{дв}$ — число двигателей.

Произведение оптовой цены на норму амортизации представляет собой стоимость одного капремонта.

Количество капремонтов за всё время эксплуатации определим по формулам:

$$n_{кр}^д = \frac{\tau_d}{\tau_{кр}^д} - 1, \quad n_{кр}^{дв} = \frac{\tau_{дв}}{\tau_{кр}^{дв}} - 1, \quad (19)$$

где $\tau_{кр}^д, \tau_{кр}^{дв}$ — межремонтный ресурс дирижабля и двигателя.

Затраты на техобслуживание — это затраты на материалы, запчасти и зарплату технического состава. Так как состав работ и длительность межрегламентных циклов техобслуживания дирижабля не известны, величина затрат на один лётный час определяется коэффициентом $K_{то}$ от часовых затрат на капремонт $C^{кр}$:

$$C^{то} = C^{кр} K_{то}. \quad (20)$$

Обработка статистических материалов показала, что:

$$K_{то} = 0,4 \div 1,2.$$

Зарплата лётно-подъёмного состава состоит из должностного оклада плюс надбавки за классность, почасовой и километровой оплаты, премий и отпускных. Зарплата командно-лётного состава обычно учитывается в размере 20 % от зарплаты командира. Размер зарплаты, приходящейся на один лётный час, определяется исходя из общего месячного фонда зарплаты ($\Phi_{общ}$), месячной нормы налёта часов на экипажи ($\tau_{мес}$) и потребного количества экипажей на один рейс ($n_{эк}$):

$$C_{зпл} = \frac{\Phi_{общ}}{\tau_{мес}} n_{эк}. \quad (21)$$

Рассчитывается показатель $n_{эк}$, исходя из продолжительности рейса t_p и допустимой нормы налёта часов одним экипажем за рейс, который принимается равным 6 ч:

$$n_{эк} = \frac{t_p}{6},$$

$$n_{эк} = 1,2,3.$$

К прочим прямым расходам относятся затраты по непроизводственному налёту часов. Их размер в среднем равен 5 % от вышеперечисленных статей прямых расходов:

$$C_{\text{пр}} = (C_{\text{рем}} + C_{\text{нап}} + C_{\text{р}} + C_{\text{кр}} + C_{\text{то}} + C_{\text{зпл}})^{0,05}. \quad (22)$$

Как и у любого летательного аппарата, у грузовых дирижаблей требуется учитывать расходы наземного обслуживания или аэродромные. В данном случае учитываются затраты по амортизации, текущему ремонту и обслуживанию наземного комплекса, включая ремонтные заводы. Расчёт аэродромных расходов на один лётный час составляет:

$$C_{\text{дп}} = \left(\frac{C_{\text{дп}}^{\Sigma}}{t_{\text{дп}}} + C_{\text{дп}}^{\text{гэр}} \right) \frac{q^{\text{д}}}{Q_n^{\text{г}}}, \quad (23)$$

где $C_{\text{дп}}^{\Sigma}$ — стоимость наземного комплекса, руб.; $t_{\text{дп}}$ — календарный срок службы наземного комплекса, лет; $C_{\text{дп}}^{\text{гэр}}$ — годовые эксплуатационные расходы наземного комплекса, включая затраты на НИР, руб.; $Q_n^{\text{г}}$ — заданный годовой объём перевозок, т·км; $q^{\text{д}}$ — часовая производительность дирижабля, т·км.

Полученные результаты расчёта по статьям калькуляции позволяют путём их суммирования определить себестоимость одного лётного часа C .

При расчёте себестоимости 1 т·км необходимо значение C разделить на часовую производительность $q^{\text{д}}$, которая определяется из уравнения

$$q^{\text{д}} = G_{\text{комм}}^{\text{max}} K_3 v_p, \quad (24)$$

где K_3 — коэффициент использования коммерческой нагрузки ($G_{\text{комм}}^{\text{max}}$).

Рейсовая скорость

$$v_p = V_{\text{кр}} \frac{L_{\text{бесп.}}}{L_{\text{бесп.}} + \Delta t V_{\text{кр}}}; \quad (25)$$

где $L_{\text{бесп}}$ — расстояние беспосадочного полёта.

Потери времени на эволюционных участках составят:

$$\Delta t = 0,2 \div 0,4.$$

Величина $C_{\text{ткм}}^{\text{д}}$ рассчитывается для $L_{\text{бесп}} = L_{\text{бесп}}^{\text{max}}$ при $G_{\text{комм}}^{\text{max}}$.

4. Выводы

Данная методика позволяет, в зависимости от себестоимости лётного часа, потребного годового налёта часов на один дирижабль, размера парка дирижаблей, капитальных вложений в t -й год на i -й стадии, объёма работ за весь цикл эксплуатации и объёма работ в t -й год эксплуатации, определить срок окупаемости капиталовложений через показатели абсолютной эффективности и минимум приведённых затрат через сравнительную эффективность. По этой методике также можно сравнивать себестоимости лётного часа разных дирижаблей, а также дирижаблей с самолётами и вертолётами.

Благодарности

Авторы благодарят кандидата технических наук Бойко Юрия Степановича, кандидата технических наук Щербакова Юрия Викторовича и Русское Воздухоплавательное Общество за оказанные консультации при подготовке научного материала для данной статьи. Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Часть материалов исследования получена за счёт гранта Российского научного фонда № 22-26-00009, <https://rscf.ru/project/22-26-00009/>.

Список литературы

1. Электроусилитель рулевого управления колёсного транспортного средства для горных лесов / В. А. Каляшов, В. А. Макуев, С. И. Ревяко [и др.] // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2022. № 11. С. 8—15.
2. 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.
3. Каляшов В. А., Куницкая О. А., Григорьева О. И. Современные технологии и системы машин для заготовки древесины на склонах // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: Материалы 86-й научно-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с междунар. участием). Минск, 2022. С. 46—49.
4. Моделирование процесса образования колеи в массиве оттаивающего почвогрунта на склонах при динамическом взаимодействии с колёсной лесной машиной / В. А. Каляшов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 1 (53). С. 154—162.
5. Никифоров О. А., Куницкая О. А. Пути совершенствования схем лесной сертификации в области оценки экологического воздействия // Вестник АГАТУ. 2022. № 3 (7). С. 55—69.
6. Скобцов И. Г., Куницкая О. А. Разработка устройств дополнительной защиты оператора лесной машины // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2023. № 1. С. 8—24.
7. Скобцов И. Г., Куницкая О. А. Требования стандартов по безопасности при работе на лесных машинах // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022. № 1. С. 51—56.
8. Скобцов И. Г., Куницкая О. А. Обзор конструктивных решений защитных устройств кабин лесных машин // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022. № 1. С. 60—69.
9. Зорин М. В., Куницкая О. А. Инновационные методы строительства лесных дорог // 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. 84—87.

10. Зорин М. В., Куницкая О. А. Современные сборно-разборные покрытия для строительства временных лесных дорог и технологических коридоров // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: Материалы 86-й научно-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с междунар. участием). Минск, 2022. С. 54—57.
11. Абузов А. В. Возможность применения аэростатических летательных аппаратов в лесохозяйственной сфере // Философия современного природопользования в бассейне реки Амур = アムール川流域における現代の森林利用の原理: Материалы VIII междунар. научно-практич. конф. (Хабаровск, 30 апреля 2019 г.) / Отв. ред. П. Б. Рябухин. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2019. Вып. 8. С. 72—75.
12. Абузов А. В., Рябухин П. Б. Транспортное освоение труднодоступных лесных территорий с применением летательных аппаратов: Учеб. пособие / ФГБОУ ВО «ТОГУ». Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2020. 115 с.
13. Отчёт о научно-исследовательской работе «Исследование возможностей использования летательных аппаратов на лесозаготовках в горных условиях»: В 2 ч. Химки: ЦНИИМЭ, 1985. 189 с.
14. Куницкая О. А., Просужих А. А., Каляшов В. А. Эколого-экономическая эффективность эксплуатации форвардеров // Вестник АГАТУ. 2021. № 2 (2). С. 44—53.
15. Абузов А. В., Григорьев И. В., Абузов Я. А. К вопросу аэродинамики корпусов транспортно-грузовых дирижаблей, проектируемых для лесного комплекса // Лесотехнический журнал. 2022. Т. 12. № 1 (45). С. 68—81.
16. Козловский В. Б., Худоленко О. В., Деревянко В. С. Аэростатические летательные аппараты для отраслей экономики. М.: Воздушный транспорт, 2007. 480 с.
17. Бойко Ю. С. Воздухоплавание: Привязное. Свободное. Управляемое. М.: МГУП, 2001. 462 с.
18. Провести исследование целесообразности создания и применения нетрадиционных летательных аппаратов в народном хозяйстве СССР: Отчёт о НИР / Руководители: Козловский В. Б., Худоленко О. В.; Отв. исполнитель Деревянко В. С. Краснодар: НПО ПАНХ ГА, 1990. 245 с.
19. Daniel Y. Guimier, Vern G. Wellburn Logging with heavy-lift airships // FERIC, Technical Report. 1984. No. TR-58 (May). 115 p.

References

1. Kalyashov V. A., Makuyev V. A., Revyako S. I., Grigorev I. V., Burmistrov V. A. Electric power steering of a wheeled vehicle for mountain forests. *Repair. Recovery. Modernization*, 2022, no. 11, pp. 8—15. (In Russ.)
2. Kalyashov V. A., A. Do Tuan, 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.)
3. Kalyashov V. A., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Modern technologies and systems of machines for harvesting wood on slopes. *Forest engineering, materials science and design. materials of the 86th scientific and Technical conference of the teaching staff, researchers and postgraduates (with international participation)*. Minsk, 2022, pp. 46—49. (In Russ.)
4. Kalyashov V. A., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Modeling of the process of track formation in an array of thawing soil on slopes with dynamic interaction

- with a wheeled forest machine. *The system. Methods. Technologies*, 2022, no. 1 (53), pp. 154—162. (In Russ.)
5. Nikiforov O. A., Kunitskaya O. A. Ways to improve forest certification schemes in the field of environmental impact assessment. *Herald of AGATHU*, 2022, no. 3 (7), pp. 55—69. (In Russ.)
 6. Skobtsov I. G., Kunitskaya O. A. Development of additional protection devices for the operator of a forest machine. *Occupational safety and health in logging and woodworking industries*, 2023, no. 1, pp. 8—24. (In Russ.)
 7. Skobtsov I. G., Kunitskaya O. A. Requirements of safety standards when working on forest machines. *Occupational safety and health in logging and woodworking industries*, 2022, no. 1, pp. 51—56. (In Russ.)
 8. Skobtsov I. G., Kunitskaya O. A. Review of design solutions of protective devices of cabins of forest machines. *Occupational safety and health in logging and woodworking industries*, 2022, no. 1, pp. 60—69. (In Russ.)
 9. Zorin M. V., Kunitskaya O. A. Innovative methods of construction of forest roads. *Innovations in the chemical and forestry complex: trends and prospects of development. Materials of the All-Russian Scientific and practical conference*. Ed. Yu. A. Bezrukhikh, E. V. Melnikova. Krasnoyarsk, 2022, pp. 84—87. (In Russ.)
 10. Zorin M. V., Kunitskaya O. A. Modern collapsible coatings for the construction of temporary forest roads and technological corridors. *Forest engineering, materials science and design. materials of the 86th scientific and Technical conference of the teaching staff, researchers and postgraduates (with international participation)*. Minsk, 2022, pp. 54—57. (In Russ.)
 11. Abuzov A. V. The possibility of using aerostatic aircraft in the forestry sector. *Philosophy of modern nature management in the Amur River basin = アムール川流域における現代の森林利用の原理: Materials of the VIII International Scientific and Practical Conference (Khabarovsk, April 30, 2019)*. Ed. P. B. Ryabukhin. Khabarovsk, Publishing House of the Pacific State University, 2019, is. 8, pp. 72—75. (In Russ.)
 12. Abuzov A. V., Ryabukhin P. B. *Transport development of hard-to-reach forest territories with the use of aircraft: a textbook*. FGBOU VO «TOGU». Khabarovsk, TOGU Publishing House, 2020. 115 p. (In Russ.)
 13. Report on the research work «Investigation of the possibilities of using aircraft for logging in mountainous conditions»: In 2 parts. Khimki, TSNIIME, 1985. 189 p. (In Russ.)
 14. Kunitskaya O. A., Prosuzhikh A. A., Kalyashov V. A. Ecological and economic efficiency of forwarders operation. *Bulletin of AGATU*, 2021, no. 2 (2), pp. 44—53. (In Russ.)
 15. Abuzov A. V., Grigorev I. V., Abuzov Ya. A. On the issue of aerodynamics of the hulls of transport and cargo airships designed for the forest complex. *Forestry Journal*, 2022, vol. 12, no. 1 (45), pp. 68—81. (In Russ.)
 16. Kozlovsky V. B., Khudolenko O. V., Derevyanko V. S. *Aerostatic aircraft for economic sectors*. Moscow, Air Transport, 2007. 480 p. (In Russ.)
 17. Boyko Yu. S. *Aeronautics: Tethered. Free. Managed*. Moscow, MGUP, 2001. 462 p. (In Russ.)
 18. To conduct a study of the feasibility of creating and using unconventional aircraft in the national economy of the USSR. Research Report. Managers: Kozlovsky V. B., Khudolenko O. V.; Responsible executor Derevyanko V. S. Krasnodar, NGO PANKH GA, 1990. 245 p. (In Russ.)
 19. Daniel Y. Guimier, Vern G. Wellburn Logging with heavy-lift airships. *FERIC, Technical Report*, 1984, no. TR-58 (May). 115 p.

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7083

УДК 620.1.05

Статья

Устройство для испытания звукоизоляции древесных панелей

Мохирев Александр Петрович

доктор технических наук, доцент, Инженерно-строительный институт

Сибирского федерального университета (Российская Федерация), amokhirev@sfu-kras.ru

Храмов Игорь Владимирович

аспирант, Инженерно-строительный институт Сибирского федерального университета

(Российская Федерация), ikhramov@sfu-kras.ru

Амельчугов Сергей Петрович

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Сибирская

пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России» (Российская Федерация),

asp-911@yandex.ru

Лях Николай Иванович

кандидат технических наук, доцент, Инженерно-строительный институт

Сибирского федерального университета (Российская Федерация), layx@mail.ru

Смирнов Иван Юрьевич

студент, Инженерно-строительный институт Сибирского федерального университета

(Российская Федерация), smivan192002@gmail.com

Получена: 27 марта 2023 2023/ Принята: 19 мая 2023 / Опубликовано: 25 мая 2023

Аннотация: При развитии деревянного домостроения очень важно применять экологически чистые материалы с экономическими и техническими характеристиками, удовлетворяющие как домостроителя, так и жильца. В последнее время всё больше обращают внимание на древесные панели, которые по многим параметрам превосходят свои аналоги. При применении деревянных панелей различных конструктивных вариантов очень важны их характеристики, одной из значимых является звукоизоляция. При патентном поиске обнаружены изобретения для определения звукоизоляции материалов, однако они не направлены на определение звукоизоляции панелей или предназначены для крупноразмерных панелей, что затрудняет их использование в лабораторных

условиях. Цель настоящих исследований — предложить установку и способ измерения для определения звукоизоляции деревянных панелей (древесных плит) от воздушного шума. Цель достигается особенностями предлагаемой конструкции изобретения, заключающимися в наличии акустических звукоизоляционных камер высокого и низкого давления, позволяющих использовать установку в условиях окружающего шума до 75 дБ и размещать между ними испытываемую панель 327×327 мм (активная площадь испытания диаметром 315 мм). Предлагаемая конструкция позволяет исследовать образцы толщиной до 150 мм, как одно-, так и многослойные. В качестве тестовых образцов были использованы панели с известными звукоизоляционными свойствами: пенопласт, пенополиуритан, трёхслойная фанера, изовер. При сравнении полученных результатов с известными звукоизоляционными характеристиками данных материалов отклонение составило не более 8 %, что подтверждает работоспособность установки. Также испытания проводились на трёхслойных древесных панелях, собранных из соснового мебельного щита толщиной 18 мм. Предложенная установка и способ измерения не противоречат межгосударственному стандарту ГОСТ 27296-2012 «Здания и сооружения. Методы измерения звукоизоляции ограждающих конструкций». Данную установку можно эффективно использовать для определения звукоизоляции различных панелей, в т. ч. деревянных. Это позволит определять возможности их применения в различных условиях деревянного домостроения.

Ключевые слова: деревянное домостроение; древесная панель; звукоизоляция; установка

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7083

Article

A device for testing the sound insulation of wood panels

Aleksander Mokhirev

D. Sc. in engineering, associate professor, Civil Engineering Institute of Siberian Federal University (Russian Federation), amokhirev@sfu-kras.ru

Igor Khramov

Ph. D. student, Civil Engineering Institute of Siberian Federal University (Russian Federation), ikhramov@sfu-kras.ru

Sergey Amelchugov

D. Sc. in engineering, leading researcher, Siberian Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia (Russian Federation), asp-911@yandex.ru

Nikolay Lyakh

Ph. D. in engineering, associate professor, Civil Engineering Institute of Siberian Federal University (Russian Federation), layx@mail.ru

Ivan Smirnov

Student, Civil Engineering Institute of Siberian Federal University (Russian Federation), smivan192002@gmail.com

Received: 27 March 2023 / Accepted: 19 May 2023 / Published: 25 May 2023

Abstract: In the development of wooden house construction, it is very important to use environmentally friendly materials with economic and technical characteristics that satisfy both the housebuilder's and tenant's needs. Recently more attention has been paid to wood panels, which in many respects surpass their counterparts. When using wooden panels of various designs their characteristics are very important, one of the most important of which is sound insulation. During the patent search, inventions were found to determine the sound insulation of materials, but they are not aimed at determining the sound insulation of panels or are intended for large-sized panels, which makes it difficult to use them in laboratory conditions. The article is focused on the installation design to determine the sound insulation of wooden panels (wood slabs) from the air noise. The proposed installation consists of acoustic sound-proofing chambers of high and low pressure levels allowing the installation to be used in ambient noise conditions up to 75 dB and to place a 327x327 mm test panel between them (the

active test area with a diameter of 315 mm). The proposed design makes it possible to study samples up to 150 mm thick, both single- and multi-layered ones. Panels made from foam, polyurethane foam, three-layer plywood, isover whose sound insulation properties are known were used as test samples. When comparing the obtained results with the known sound insulation characteristics of these materials the deviation was no more than 8%. which confirms the operability of the installation. The tests were also performed on three-layer wood panels assembled from a pine furniture board with a thickness of 18 mm. The proposed installation characteristics comply with the interstate standard GOST 27296-2012 "Buildings and structures. Methods for measuring sound insulation of enclosing structures". This installation can be effectively used to determine the sound insulation of various panels, including wooden ones. This will allow us to determine the possibilities of their application in various conditions of wooden house construction.

Keywords: wooden house construction; wood panel; sound insulation; installation

1. Введение

В европейских странах деревянные дома считаются элитным жильём. В России тоже востребованность деревянного домостроения увеличивается. Актуальность поддерживается постановлениями Правительства РФ по развитию деревянного домостроения. Преимущество такого жилья давно доказано разными исследованиями [1], [2]. В настоящее время актуальным направлением является многоэтажное деревянное домостроение [3], [4]. Одним из перспективных древесных материалов при строительстве жилых зданий и сооружений являются крупноразмерные плиты [5], [6]. Такой материал практически сохраняет все достоинства натурального дерева и устраняет многие его недостатки.

Для эффективности деревянного домостроения разрабатывают и внедряют различные варианты из данного материала [7]. Панели комбинируют с другими материалами [8—10] или изменяют их конструкцию [11], [12]. При этом изменяются их характеристики (шумо- и теплоизоляция, экологические, несущая способность и т. д.), очень важно, чтобы они, по возможности, не ухудшались.

Звукоизоляция панелей в деревянном домостроении зависит от физико-механических характеристик материалов внешних облицовок и среднего слоя, а также способа соединения слоёв ограждения между собой. Для создания панелей с высокими звукоизолирующими свойствами необходим способ расчёта их звукоизоляции, учитывающий все вышеперечисленные параметры. А для проверки их звукоизоляционных свойств необходимо эффективное устройство с возможностью применения в лабораторных условиях.

Настоящее исследование направлено на разработку устройства для испытания звукоизоляции панелей.

Известно устройство для измерения звукоизоляции образцов материалов, содержащее камеры высокого и низкого давления, между которыми размещён испытуемый образец материалов [13]. Однако это устройство не направлено на измерение панелей.

Также известно устройство для измерения образцов материалов, содержащее камеры высокого и низкого давления в виде двух концентрических полусфер с общим основанием, между которыми размещён испытуемый образец [14]. Однако также используя данное устройство, невозможно испытывать строительные панели.

Наиболее близким по технической сущности является акустический интерферометр [15], представляющий собой бетонную трубу квадратного сечения с внутренними размерами 800×800 мм и стенками толщиной 160 мм. По торцам труба закрыта массивными стенками. На одном из концов трубы размещён низкочастотный излучатель звука электродинамического типа с диффузором диаметром 400 мм. Для исключения низкочастотных помех акустический интерферометр амортизирован с помощью пневматических резинокордных амортизаторов с резинокордной оболочкой модели Н-103.

Недостатками данного технического решения являются его громоздкость и сложность в процессе измерения.

Цель настоящих исследований — предложить установку и способ измерения для определения звукоизоляции панелей от воздушного шума.

2. Материалы и методы

При разработке установки использовались доступные материалы, имеющие шумоизоляционные свойства: песок кварцевый, шумопласт (гранулированный полимеризующийся материал с индексом снижения уровня шума до 32 дБ), полиуритан.

В качестве источника звука применена портативная колонка мощностью 5W и максимальным звуковым давлением 80 дБ. Использовался шумомер Testo 816-2 с сертификатом калибровки. Имеется возможность сохранения показаний (с частотой 1 с) в виде файлов данных, совместимых с приложениями для создания электронных таблиц на ПК.

Звукоизоляция установки рассчитана согласно СНиП 23-03-2003 «Нормы проектирования. Защита от шума» и СП 23-103-2003 «Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий» к СНиП 23-03-2003.

3. Результаты

Для достижения поставленной цели разработаны установка и способ измерения звукоизоляции панелей от воздушного шума. Схема устройства в разрезе показана на рисунке 1. Установка состоит из двух частей, корпуса которых 3 и 9 выполняют ограждающую роль. Нижняя часть 3 установки стационарна, верхняя часть 9 — съёмная. Так как установка предназначена для измерения звука, главным условием была тщательная звукоизоляция корпуса от окружающей среды, которая была достигнута за счёт наличия в устройстве звукоизоляционных вкладышей, расположенных в местах соединения деревянной рамы с верхним и нижним корпусами, песка, находящегося между нижней трубой и нижним корпусом, и шумопласта, размещённого между верхней трубой и верхним корпусом. Звукоизоляционная камера высокого уровня давления ограничивается цилиндрической полиуретановой трубой 11, жёстко закреплённой с шумоизоляционными материалами 2, 4, 10 и корпусом нижней части устройства 9. Камера низкого уровня давления ограничивается цилиндрической полиуретановой трубой 1 и перемещается вертикально относительно шумоизоляционных материалов 4, 5 и корпуса верхней части устройства 3. В камере высокого давления располагается источник звука 13, в камере низкого давления — шумомер 6. Камера высокого уровня давления сверху ограничивается звукоизоляционной крышкой 2. Камера низкого давления снизу ограничивается звукоизоляционной вкладкой 12. Между камерами высокого и низкого давления располагается испытуемая панель 14, которая по контуру ограничивается

звукоизоляционными вкладышами 8 и деревянной рамкой 7, они выполняют герметизирующую функцию.

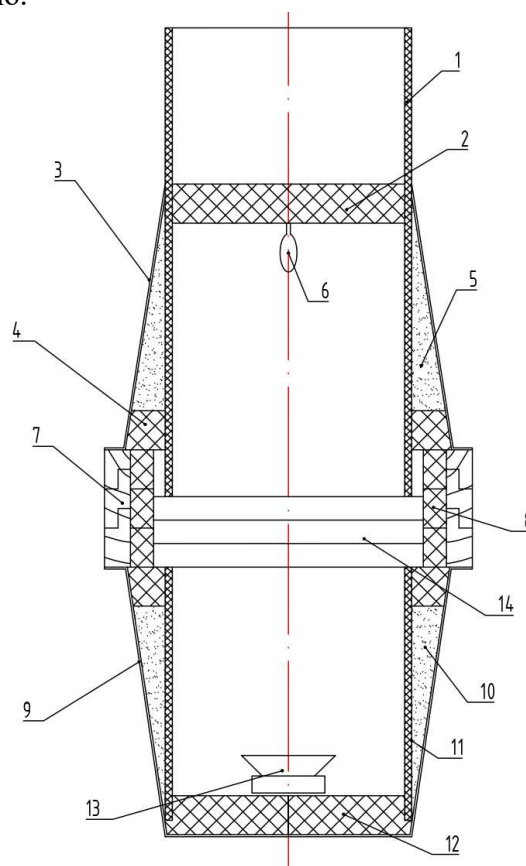


Рисунок 1. Схема установки: 1 — труба верхняя, 2 — звукоизоляционная крышка, 3 — корпус верхний, 4 — вкладыш корпуса, 5 — шумопласт, 6 — шумомер, 7 — деревянная рама, 8 — звукоизоляционные вкладыши, 9 — корпус нижний, 10 — песок, 11 — труба нижняя, 12 — звукоизоляционная вкладка, 13 — источник звука

Figure 1. Installation scheme: 1 — upper pipe, 2 — sound insulation cover, 3 — upper housing, 4 — housing liner, 5 — noise layer, 6 — noise meter, 7 — wooden frame, 8 — sound insulation inserts, 9 — lower housing, 10 — sand, 11 — lower pipe, 12 — sound insulation tab, 13 — sound source

Принцип работы устройства показан на рисунке 2. Испытуемую панель размером 327×327 мм (активная площадь испытания диаметром 315 мм) помещают внутри контура звукоизоляционных вкладышей 8, укладывая на плоскость звукоизоляционного вкладыша 4 и трубы 11 нижней части устройства. Сверху размещается верхняя часть устройства. Труба 1 путём вертикального перемещения прижимается к испытуемой панели, в зависимости от её толщины. Источник звука 13, расположенный в камере высокого уровня давления, начинает генерировать звуковую волну, которая является поперечной механической волной

и падает по нормали к поверхности горизонтально расположенной панели. Источник звука генерирует звук различной частоты. Достигая нижней поверхности испытуемой панели, доля звуковой энергии поглощается материалом панели. Шумомер 6, расположенный в камере низкого давления, улавливает ослабленную звуковую волну, после чего по считанным с шумомера показаниям можно вычислить индекс звукоизоляции R_w с помощью следующей формулы:

$$R_w = I_0 - I_1, \quad (1)$$

где I_1 — интенсивность звуковой волны после прохождения через материал плиты, I_0 — интенсивность звуковой волны, сгенерированной источником.

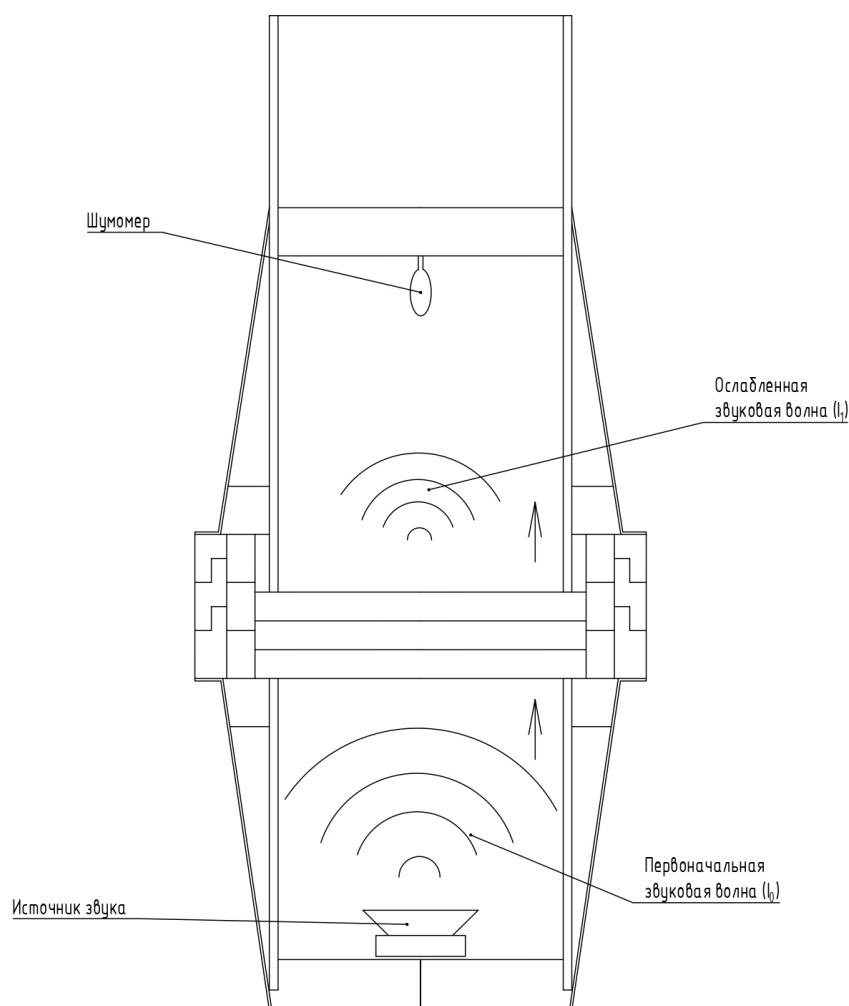


Рисунок 2. Принцип работы устройства для испытания звукоизоляции древесных панелей

Figure 2. The principle of operation of the device for testing the sound insulation of wood panels

4. Обсуждение и заключение

Предложенная установка и способ измерения не противоречат межгосударственному стандарту ГОСТ 27296-2012 «Здания и сооружения. Методы измерения звукоизоляции ограждающих конструкций».

Разработка соответствует общим принципам подобных устройств — наличие источника звука, шумомера или микрофона и закрепляемого между ними испытуемого образца. Однако можно выделить некоторые особенности (положительно отличающие предлагаемую конструкцию), заключающиеся в наличии акустических звукоизоляционных камер высокого и низкого давления, позволяющих использовать установку в условиях окружающего шума до 75 дБ.

Предлагаемая конструкция позволяет исследовать образцы толщиной до 150 мм, как одно-, так и многослойные. В качестве тестовых образцов были использованы панели с известными звукоизоляционными свойствами: пенопласт, пенополиуритан, трёхслойная фанера, изовер. При сравнении полученных результатов с известными звукоизоляционными характеристиками отклонение составило не более 8 %, что подтверждает работоспособность установки. Также испытания проводились на трёхслойных древесных панелях, собранных из соснового мебельного щита толщиной 18 мм.

Данную установку можно эффективно использовать для определения звукоизоляции различных панелей, в т. ч. деревянных. Это позволит определять возможности их применения в различных условиях деревянного домостроения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке «Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности» в рамках реализации научного проекта» № 2022110309013.

Список литературы

1. Обзор технологий деревянного домостроения / И. С. Инжутов, К. А. Рудяк, Н. И. Лях [и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2021. № 1. С. 47—61. DOI: 10.25686/2542-114X.2021.1.47.
2. Massive wood material for sustainable building design: the Massiv-Holz-Mauer wall system / S. Santi, F. Pierobon, G. Corradini [et al.] // Journal of Wood Science. 2016. No. (62). P. 416—428.
3. Sil'man Yu. Yu., Ponomarev R. A. Wooden skyscrapers as an innovative and ambitious solution to the issues posed by urbanization // Problems of the economy and construction management in conditions of ecologically oriented developmen, 14—15 апреля 2020 года. Иркутск: Байкал. гос. ун-т, 2021. P. 327—333.
4. Бойтемиров Ф. А. Перспективность применения древесины в высотных зданиях на основе проведённого исследования // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2021. № 10 (1046). С. 37—39.

5. Решетников А. В., Макаридзе Г. Д. Современные технологии деревянного домостроения. Массивные деревянные панели // *Colloquium-Journal*. 2019. № 13-2 (37). С. 187—188. DOI: 10.24411/2520-6990-2019-10371.
6. Вдовин В. М., Карпов В. Н. Полносорный деревянный дом из крупных индустриальных панелей. Пенза: Пензен. гос. ун-т архитектуры и строительства, 2015. 148 с.
7. Лысенко А. О. Обзор российских и зарубежных технологий производства многослойных деревянных панелей // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: Строительство и архитектура. 2018. Т. 18, № 4. С. 44—52.
8. Патент № 2524819 С2 Российская Федерация, МПК В27N 3/04. Древесная плита и способ изготовления древесной плиты / Хаш Й., Грунвальд Д. № 2011139176/13. Заявл. 24.02.2010; опубл. 10.08.2014.
9. Патент № 2702591 С1 Российская Федерация, МПК В32В 21/02, В32В 21/06, В32В 21/14. Многослойная плита из древесного материала со средним слоем из фанеры / Р. Браун, Й. Хофер. № 2018132181. Заявл. 18.01.2017; опубл. 08.10.2019; заявитель СВИСС КРОНО ТЕК АГ.
10. Патент № 2784506 С1 Российская Федерация, МПК В27N 3/06. Древесная плита / Разиньков Е. М., Поздняков Е. В., Сафаров К. Ш., Горовенко Д. Ю. № 2022110529. Заявл. 19.04.2022; опубл. 28.11.2022; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова».
11. Шамсутдинов В. Ш. Деревянный строительный блок для возведения малоэтажных зданий // *Инженерный вестник Дона*. 2018. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4870. Текст: электронный.
12. Совершенствование конструкции древесной панели для повышения звукоизоляции / И. В. Храмов, А. П. Мохирев, С. П. Амельчугов [и др.] // *Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее: Сб. науч. ст. по материалам Всерос. научно-практич. конф., посвящённой 40-летию создания Инженерно-строительного института, Красноярск, 19—21 октября 2022 года*. Красноярск: Сибир. федер. ун-т, 2022. С. 356—359.
13. А. с. СССР № 159305, кл. G 10 к 11/00, 1963.
14. А. с. СССР № 838704, кл. G 10 к 11/00, 1981.
15. Метод измерения звукоизоляции панелей с помощью акустического интерферометра / И. А. Трибельский, В. В. Бохан, А. В. Зубарев [и др.] // *Омский научный вестник*. 2012. № 3 (113). С. 88—94.

References

1. Injutov I. S., Rudyak K. A., Lyakh N. I., Deordiev S. V., Zhadanov V. I. Review of technologies of wooden house construction. *Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies*, 2021, no. 1, pp. 47—61. doi: 10.25686/2542-114X.2021.1.47. (In Russ.)
2. Santi S., Pierobon F., Corradini G., Cavalli R., Zanetti M. Massive wood material for sustainable building design: the Massive-Holz-Mauer wall system. *Journal of Wood Science*, 2016, no. (62), pp. 416—428.
3. Sil'man Yu. Yu., Ponomarev R. A. Wooden skyscrapers as an innovative and ambitious solution to the issues posed by urbanization. *Problems of the economy and construction management in conditions of ecologically oriented developmen*, April 14—15, 2020. Irkutsk, Baikal State University, 2021, pp. 327—333.

4. Boytemirov F. A. Prospects for the use of wood in high-rise buildings based on the conducted research. *BST: Bulletin of Construction Equipment*, 2021, no. 10 (1046), pp. 37—39. (In Russ.)
5. Reshetnikov A. V., Makaridze G. D. Modern technologies of wooden house construction. Massive wooden panels. *Colloquium-Journal*, 2019, no. 13-2 (37), pp. 187—188. doi: 10.24411/2520-6990-2019-10371. (In Russ.)
6. Vdovin V. M., Karpov V. N. *A fully assembled wooden house made of large industrial panels*. Penza, Penza State University of Architecture and Construction, 2015. 148 p. (In Russ.)
7. Lysenko A. O. Review of Russian and foreign technologies for the production of multilayer wooden panels. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and Architecture*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 44—52. (In Russ.)
8. Hash Y., Grunwald D. Patent No. 2524819 C2 Russian Federation, IPC B27N 3/04. Wood slab and method of manufacturing wood slab. No. 2011139176/13; application 24.02.2010; publ. 10.08.2014. (In Russ.)
9. Brown R., Hofer J. Patent No. 2702591 C1 Russian Federation, IPC B32B 21/02, B32B 21/06, B32B 21/14. Multilayer board made of wood material with an average layer of plywood. No. 2018132181; application 18.01.2017; publ. 08.10.2019; applicant SWISS KRONO TECH AG. (In Russ.)
10. Razinkov E. M., Pozdnyakov E. V., Safarov K. S., Gorovenko D. Yu. Patent No. 2784506 C1 Russian Federation, IPC B27N 3/06. Wood plate. No. 2022110529; application 04/19/2022; publ. 11/28/2022; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov». (In Russ.)
11. Shamsutdinov V. Sh. Wooden building block for the construction of low-rise buildings. *Engineering Bulletin of the Don*, 2018, no. 2. Available at: ivdon.ru/ru/magazine-/archive/n2y2018/4870. Text. Image: electronic. (In Russ.)
12. Khramov I. V., Mokhirev A. P., Amelchugov S. P., Khramova K. R. Improving the design of a wood panel to increase sound insulation. *Topical issues of construction: a look into the future: A collection of scientific articles based on the materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the 40th anniversary of the establishment of the Civil Engineering Institute*. Krasnoyarsk, October 19—21, 2022. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2022, pp. 356—359. (In Russ.)
13. USSR Copyright Certificate No. 159305, cl. G 10 to 11/00, 1963. (In Russ.)
14. USSR Copyright Certificate No. 838704, cl. G 10 to 11/00, 1981. (In Russ.)
15. Tribelsky I. A., Bohan V. V., Zubarev A. V., Popkov S. V. The method of measuring the sound insulation of panels using an acoustic interferometer. *Omsk Scientific Bulletin*, 2012, no. 3 (113), pp. 88—94. (In Russ.)

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7143

УДК 630 * 319

Статья

Исследование почвенных субстратов на основе отходов деревообработки для выращивания лесных семян

Графова Елена Олеговна

кандидат технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), grafova.elena.karelia@gmail.com

Гаврилова Ольга Ивановна

доктор сельскохозяйственных наук, доцент, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), ogavril@petrsu.ru

Горбач Вячеслав Васильевич

доктор биологических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), gorbach@petrsu.ru

Получена: 12 марта 2023 / Принята: 16 мая 2023 / Опубликовано: 25 мая 2023

Аннотация: Низкая выживаемость семян, снижение плодородия, нарушения лесных почв приводят к недостаточному уровню лесовосстановления в России. Решением данной проблемы может служить подготовка питательных субстратов, компенсирующих дефицит плодородных почв и повышающих устойчивость искусственных лесных насаждений. Почвенные субстраты производились из отходов лесопромышленных предприятий Карелии методом компостирования с добавлением осадка сточных вод близлежащих предприятий ЖКХ. Оценка плодородных свойств субстратов проверялась на всхожести семян и определении скорости роста овса (*Avena sativa* L.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Субстраты сравнивались с торфосмесью заводского производства. Распределение вариантов в выборках на соответствие нормальному закону проверяли критерием Шапиро — Уилка. Для статистической обработки данных использовали методы ресамплинга. Диапазон варьирования показателей оценивали посредством простого непараметрического бутстрепа, доверительные интервалы устанавливали методом процентилей. Для сравнений использовали рандомизационный тест MCR. Тренды изменчивости показателей во времени описывали логарифмическими моделями. Для производства субстратов были использованы опилки сосны (субстрат 1) и кора сосны (субстрат 2). Время производства субстратов отличалось: 5 месяцев и 1,5 года соответственно.

Полученные субстраты отличались по химическому составу и морфологической консистенции. В обоих субстратах содержание тяжёлых металлов, отсутствие патогенных микроорганизмов и паразитов соответствовало санитарным нормам, что определяло безопасность их применения. Всхожесть овса варьировала от 0 до 100 %. Длина растений в контроле не отличалась существенно от субстрата 2, но была значимо больше, чем в субстрате 1. Всхожесть семян сосны составила от 20 до 100 %, по числу проросших семян сеянцы значимо не различались, самый медленный рост сеянцев наблюдали в субстрате 1, самый быстрый — в субстрате 2. Средние скорости роста растений в торфе и субстрате 2 значимо не различались. Таким образом, установлено отсутствие существенных различий, испытываемых субстратов для прорастания семян. Результаты исследований свидетельствуют о том, что плодородные свойства полученных субстратов значительно не отличаются от торфосмеси, подготовленной в заводских условиях. Субстраты, полученные при свежем и длительном сроках хранения древесных отходов, можно использовать для выращивания сеянцев в питомниках и повышения плодородия лесных почв при лесовосстановлении и для рекультивации нарушенных земель.

Ключевые слова: почвенный субстрат; древесный субстрат; компостирование; биологическая обработка древесных отходов; лесовосстановление; выращивание сеянцев

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7143

Article

Study of wood waste-based soil substrates for forest seedlings growing

Elena Grafova

*PhD in engineering, associate professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation),
grafova.elena.karelia@gmail.com*

Olga Gavrilova

*D. Sc. in agriculture, associate professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation),
ogavril@petrusu.ru*

Viacheslav Gorbach

*D. Sc. in biology, associate professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation),
gorbach@petrusu.ru*

Received: 12 March 2023 / Accepted: 16 May 2023 / Published: 25 May 2023

Abstract: The seedlings low survival rate, reduced soil fertility and forest soils disturbance result in insufficient reforestation in Russia. This problem might be solved by cultivation substrates preparation that compensate for the lack of fertile soils and increase the sustainability of homogeneous forest plantations. Cultivation substrates were produced from the waste of Karelian timber industry enterprises by composting with addition of sewage sludge from nearby housing and communal services. The substrates fertile properties were evaluated by seeds germinating ability and growth rate of oats (*Avena sativa* L.) and Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.). The substrates properties were compared with those of factory-made peat mixture. The distribution of the variant in the samples for compliance with the normal law was checked by the Shapiro-Wilk test. Resampling methods were used for statistical data processing. The range of variation of indicators was estimated using a simple nonparametric bootstrap method, and confidence intervals were established by the percentile method. The MCR randomization test was used for comparisons. Trends in the variability of indicators over time were described by logarithmic models. Substrates were produced by using pine sawdust (substrate 1) and bark (substrate 2). The production time of the substrates varied: 5 months and 1.5 years, respectively. The resulting substrates differed in chemical composition and morphological consistency. In both substrates, the content of heavy metals and the absence of pathogenic microorganisms and parasites corresponded

to sanitary standards thus ensuring their safety usage. The germination of oats seeds varied from 0 to 100%. The plants height in the control group did not differ significantly from that of substrate 2, but was significantly greater than in substrate 1. The germination rate of pine seeds ranged from 20 to 100%, the slowest seedlings growing rate was observed in substrate 1, the fastest one — in substrate 2. The average growing rates of plants in peat and substrate 2 did not differ significantly. Thus, no significant differences were found between the tested substrates for seed germination. The research results indicate that the fertile properties of the obtained substrates do not differ significantly from those prepared in the factory. Substrates obtained from fresh and long-term stored wood waste can be used to grow seedlings in nurseries, to increase the fertility of forest soils during reforestation, and to reclaim disturbed lands.

Keywords: soil substrate; wood substrate; composting; biological treatment of wood waste; reforestation; seedlings growing

1. Введение

Одной из актуальных проблем, сдерживающих развитие лесного комплекса, является недостаточный уход за лесами, который не позволяет повышать плодородие лесных почв и обеспечивать максимальный прирост древесины, что, в свою очередь, ограничивает возможности увеличения объёмов заготовок. Интенсивность лесовосстановления не достигает высоких уровней и темпов воспроизводства хозяйственно ценных лесов на наиболее продуктивных лесных землях, что приводит к необходимости освоения новых лесных участков, не обеспеченных транспортной инфраструктурой. За последние 20 лет ежегодные объёмы лесовосстановления остаются на уровне 800—900 тыс. га, что в два раза меньше предыдущего периода. Несоблюдение агротехники выращивания созданных лесных культур приводит к их высокой гибели в период до перевода в покрытую лесом площадь. Возникает необходимость разработки специальных мер по сохранению созданных лесных культур, повышению эффективности агротехнического ухода. Стратегия развития лесного комплекса РФ направлена на появление новых технологий, увеличение доли искусственного возобновления леса, использования семян с улучшенными наследственными свойствами, возрастания доли лесных культур, созданных с использованием посадочного материала с закрытой корневой системой, увеличение разнообразия пород лесных культур, развитие материально-технической базы путём модернизации парка лесохозяйственных машин и оборудования. Данные направления развития лесопромышленного комплекса свидетельствуют о необходимости разработки технологий, направленных на поиск решений, способствующих повышению плодородия лесных деградирующих и нарушенных почв, обеспечению стабильно высокой всхожимости семян, повышению продуктивности древостоя.

Многие исследователи рассматривали возможности повышения плодородия лесных почв путём внесения различных удобрений. Так, с точки зрения экономической целесообразности в качестве удобрения применяются лесосечные отходы. Отмечено, что процесс естественной минерализации древесины может занимать годы [1], [9], [12]. Оптимальной считается доза внесения удобрений 30 т/га, которая может быть достигнута при запасе отходов 240 м³/га. Исследованиями [3], [6] установлено, что поступление органических веществ в почву со временем меняется, несмотря на накопление отходов на лесосеке, поскольку изменяется их химический состав в процессе вымывания. Таким образом, необработанные и неподготовленные парубковые отходы, оставленные на лесосеке как плодородный компонент удобрения, не представляют интереса.

Другим источником органики могут служить кородревесные отходы, избыток которых образуется на деревообрабатывающих предприятиях. Проведение биотестирования при добавлении различных доз коры при проращивании кресс-салата (*Lepidium sativum* L.) свидетельствует о повышении биологической активности нарушенных почв при внесении дозировки 5—15 % отходов по массе [7]. Процессы разложения коры в естественных

условиях описаны в работе [14]. Содержание азота в коре значительно выше, чем в древесине, что обусловлено бóльшим количеством живых клеток в составе флоэмы [4], [5]. Наибольшее содержание азота на единицу массы выявлено у берёзы (0,95 %). Распределение содержания азота в коре пород по убыванию показателя следующее: осина (0,74 %), сосна и ель (0,61 %), лиственница (0,20 %). Кора хвойных пород имеет меньшие концентрации азота по сравнению с корой лиственных пород [15]. Со временем химический состав коры, хранящейся в отвалах, также меняется (таблица 1). Наиболее пригодна для удобрения свежесформованная кора, поскольку она содержит более высокие концентрации органического вещества, фосфора, калия.

Таблица 1. Химический состав кородревесных отходов различного срока хранения

Table 1. The chemical composition of bark and wood waste of various storage periods

№ п/п	Наименование показателя	Продолжительность хранения коры				
		Кора свежая	0—3 лет	3—5 лет	5—10 лет	более 10 лет
1	2	3	4	5	6	7
1	Азот общий, мас. %	0,015	0,008	0,020	0,015	0,550
2	Азот нитратный, мг/кг	4,1	3,0	2,3	1,0	1,40
3	Фосфор, мг/кг	4,4	3,0	3,2	2,0	0,8
4	Калий, мг/кг	41,0	14,0	25,0	11,0	3,0
5	Органическое вещество, мас. %	92,6	78,6	90,3	77,4	51,2

Для удобрения почвы необходимо ускорить процесс гумификации таким методом, как компостирование, которое является наиболее простым и дешёвым способом. В процессе компостирования происходит аэробная биодеструкция древесины, сопровождаемая экзотермическим процессом, способствующим гибели патогенной микрофлоры и паразитов, семян сорняков и пр. Для начала процесса компостирования необходимо обеспечить следующие условия: соотношение углерода (C) и азота (N), влажность, микробное дыхание, время обработки. Поскольку основным компонентом древесины является углерод, для начала биодеструкции необходимо добавить необходимое количество азота. Для интенсивного протекания микробиологических процессов оптимальным является соотношение C:N, равное 25. Содержание азота можно обеспечить внесением 0,5—1 % азотных удобрений, мочевины, аммиачной селитры и органических отходов, таких как навоз, помёт, осадки сточных вод и пр. По данным авторов публикаций [5], [8], соотношение C:N в зрелом компосте составляет 68, в свежей коре — 140, в коре с отвалов — примерно 70. По величине соотношения C:N кору с отвалов можно отнести к незрелому компосту. Скорость и эффективность компостирования также зависит от вида используемых древесных отходов: осиновая кора разлагается быстрее, чем кора хвойных пород. Для ускорения разложения древесных отходов часто используется внесение специальных микроорганизмов — активаторов компостирования, которые имеют

способность к деструкции целлюлозы и лигнина, трансформации продуктов их разложения в гумус [2]. В некоторых исследованиях [11] продемонстрирована эффективность предварительной сортировки отходов хвойных и лиственных пород, т. к. они отличаются по анатомическому строению, химическому составу, скорости разложения.

Согласно исследованиям публикации [10], получаемый после обработки субстрат может использоваться для повышения плодородия почв, в т. ч. лесных, улучшения её структуры и минеральных свойств. Разработкой и внедрением технологии получения почвенных субстратов и почвогрунтов занимались многие авторы [6], [11], [41]. В настоящее время существуют технологические средства и технологии, позволяющие провести компостирование отходов любых древесных пород с применением различных, доступных для предприятий органических добавок. Основное время биотермической подготовки компоста 3—6 мес., полное время дозревания компоста составляет от 1,5 до 2 лет. С точки зрения экономической целесообразности оптимальным периодом подготовки субстрата в условиях севера должен служить один летний период, поскольку для продолжительного производства требуются большие площади, уход и контроль за процессом, применение техники. Целью настоящих исследований является проверка свойств субстратов, полученных в результате биодеструкции методом компостирования двух наиболее типичных видов древесных отходов и разных периодов выдержки компостной смеси — полной выдержки и однолетней.

2. Материалы и методы

Почвенные субстраты произведены из отходов лесопромышленных предприятий Соломенского и Сортавальского лесозаводов Карелии. Субстраты подготовлены методом компостирования. В качестве азотной составляющей использовался осадок сточных вод близлежащих предприятий ЖКХ — Петрозаводского и Сортавальского соответственно. Компостирование древесных отходов, в конкретном случае, основано на стимуляции естественной микробиоты компостной смеси. Технологические параметры производства субстратов и характеристики полученных субстратов представлены в таблицах 2 и 3. Для оценки пригодности полученных субстратов для выращивания семян при лесовосстановлении проведены исследования всхожести семян и скорости роста овса (*Avena sativa* L.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Для сравнения в качестве контрольного субстрата выбрана торфосмесь (Фаско, Россия) заводского производства.

Проведено две серии экспериментов: первая серия — выращивание семян овса. Производилось в выбранных субстратах. Субстраты помещались в ёмкости для выращивания в объёме 250 мл по 15 шт. для каждого субстрата. В каждую ёмкость засеивалось по 5 семян. Вторая серия — выращивание семян сосны, проводилось таким же образом.

Таблица 2. Характеристики технологии производства субстратов

Table 2. Characteristics of substrate production technology

Наименование	Источник отходов	Вид отходов	Соотношение смеси	Время обработки
Субстрат 1	Сортавальский лесозавод; предприятие ЖКХ, г. Сортавала	Свежеобразованный осадок сточных вод, трёхлетний осадок сточных вод, опилки сосны	1 : 1 : 3	70 дней
Субстрат 2	Соломенский лесозавод; предприятие ЖКХ, г. Петрозаводск	Свежеобразованный осадок сточных вод, кора сосны	2 : 3	1,5 года

Таблица 3. Сравнение химических показателей полученных субстратов с контрольным

Table 3. The chemical parameters comparison of the obtained substrates with the control ones

Наименование показателя	Норма содержания	Субстрат 1	Субстрат 2	Торф (контроль)
Азот аммонийный, мг/кг	0,6	180	360	100—200
Азот нитритный, мг/кг		0,062	0,56	—
Фосфат-ион, не менее, мг/кг	1,5	25	25	80—150
Органическое вещество, не менее, мг/кг	20	60	63	—
Массовая доля подвижного калия, мг/кг почвы	> 250	472	951,0	200—300
Превышение содержания тяжёлых металлов, мг/кг	по ГОСТ Р 8.563	отсутствует	отсутствует	отсутствует
Присутствие патогенных микроорганизмов	по ГОСТ Р 8.563	отсутствует	отсутствует	отсутствует

Распределение вариантов в выборках на соответствие нормальному закону проверили критерием Шапиро — Уилка. Установили, что в ряде случаев эмпирические распределения значительно отклоняются от теоретического и не могут быть нормализованы с помощью стандартных процедур. Поэтому для статистической обработки данных использовали методы ресамплинга, не требующие соответствия каким-либо теоретическим закономерностям [13]. Выборки сравнивали по трём показателям — средней арифметической (M), стандартному отклонению (S), измеряющему изменчивость признака, и медиане (Me), более адекватно описывающей величину признака в выборках, отклоняющихся от нормального распределения. Диапазон варьирования показателей оценивали посредством простого непараметрического бутстрепа с числом итераций $B = 1000$, достаточным для уровня вероятности $P = 0.95$, доверительные интервалы устанавливали методом процентилей.

Для сравнений использовали рандомизационный тест (MCR — Monte Carlo Randomization) с тем же числом итераций B . Значимость отличий p при таком подходе представляет собой скорректированную долю нуль-модельных комбинаций (эмпирическая разность показателей не больше рандомизированной, $|d_{\text{obs}}| \leq |d_{\text{ran}}|$) от общего числа испытаний B . Критической величиной для p принято стандартное значение $\alpha = 0,05$.

Тренды изменчивости показателей во времени описывали логарифмическими моделями вида $y = a \cdot \ln(T) + b$, где y — число проросших семян N или высота стеблей растений L (см), а T — время в днях, модельный параметр a определили в качестве средней скорости прорастания семян или скорости роста растений соответственно. Равенство условий старта процессов обеспечили назначением коэффициента b константой. Значения a подбирали, используя итеративную процедуру подгонки под требование $b = \text{const}$. Методом ресамплинга генерировали по 100 моделей для каждого исследуемого случая, доверительные интервалы возможных значений a устанавливали методом процентиля, сравнивали с помощью MCR-теста.

Данные обрабатывали в среде MS Excel и R 4.0.1 [16] с использованием базовых функций и функций пакета Composition [17].

3. Результаты

Полученные методом компостирования и контрольный субстраты отличаются по химическому составу и морфологической консистенции. Торфяной субстрат является сбалансированным подготовленным продуктом, размеры частиц более 3 мм. Субстрат 2, полученный из отходов Соломенского лесозавода, обладает высоким содержанием азота и калия, более неоднородным морфологическим составом: встречаются размеры частиц до 16 мм в виде древесных включений. Субстрат 1, полученный из отходов Сортавальского лесозавода, имеет наиболее низкие характеристики содержания биогенных элементов и также обладает неоднородным морфологическим составом с включениями древесины размерами до 10 мм. Химический состав полученных субстратов соответствует современным требованиям, предъявляемым к почвогрунтам, подготовленным с применением осадков сточных вод. Во всех подготовленных субстратах содержание тяжёлых металлов в норме, патогенные микроорганизмы и паразиты отсутствуют, что определяет санитарную безопасность их применения.

Почти все семена овса вошли к концу первой недели наблюдений, дальнейший прирост составил менее 2 % (фото 1а). Всхожесть в пробах варьировала от 0 до 100 %. Наблюдаемые отличия по числу проросших семян для сравниваемых типов субстратов по всем показателям случайны (таблица 4). К концу эксперимента длина растений в контроле (торф) не отличалась существенно от субстрата 2, но была значимо больше, чем в субстрате 1. Вместе с тем больше была и изменчивость длины, измеряемая стандартным отклонением. Это указывает на задержку роста отдельных растений в торфе, проиллюстрированную на рисунке 1 отклонением маркеров от общего ряда. Сравнение средних скоростей роста

(таблица 5) поддерживает вывод о меньшей благоприятности для развития растений в субстрате 1.

Семена сосны прорастали больше месяца, итоговая всхожесть составила от 20 до 100 % (фото 1б).

С начала всхода активного роста ростков сосны ещё не наблюдали, он начался только через месяц и стал достаточным для выполнения корректных измерений. В то время как рост сеянцев овса был равномерным на протяжении всего периода выращивания.



Фото 1. Результаты всхожести семян на подготовленных субстратах: *а* — овёс; *б* — сосна: торф, субстрат 2, субстрат 1

Photo 1. The results of seed germination on prepared substrates: **(a)** oats; **(b)** pines: peat, substrate 2, substrate 1

По числу проросших семян испытываемые субстраты значимо не различались, лишь для торфа показана наиболее высокая изменчивость (таблица 6) — следствие большей неравномерности всхожести в разных пробах. Динамика прорастания семян дана на рисунке 2. Быстрее всего семена всходили в субстрате 2, тем не менее показанные отличия средних скоростей не существенны (таблица 7). Самый медленный рост сеянцев наблюдали в субстрате 1, самый быстрый — в субстрате 2 (рисунок 3). И если средние скорости роста растений в торфе и субстрате 2 значимо не различались, то для субстрата 1 установлено существенное отличие от базовой составляющей — торфа (таблица 8). Таким образом, установлено отсутствие существенных различий испытываемых субстратов для прорастания семян, но в торфе и субстрате 2 растения растут быстрее, чем в субстрате 1.

Таблица 4. Всхожесть семян и длина стеблей овса к концу эксперимента в разных видах субстрата

Table 4. Oats seed germination and stem length by the end of the experiment in different substrate types

Показатели	Торф	Субстрат 1	p	Субстрат 2	p
Число проросших семян					
n_a	10	10		10	
lim	0—5	1—4		0—4	
M	3,4 (2,3—4,4)	2,6 (2,1—3,1)	0,297	1,8 (1,1—2,6)	0,071
S	1,8 (0,9—2,3)	0,8 (0,4—1,1)	0,056	1,3 (0,7—1,6)	0,419
Me	3,5 (2,0—5,0)	3,0 (2,0—3,0)	0,396	2,0 (1,0—3,0)	0,146
Длина стеблей растений, см					
n_b	34	26		18	
lim	4,8—35,5	12,8—28,5		17,5—39,8	
M	26,6 (24,1—28,6)	22,6 (21,4—23,7)	0,010	29,4 (26,6—32,2)	0,170
S	6,8 (4,2—9,0)	3,2 (1,7—4,3)	0,003	6,0 (4,2—7,4)	0,756
Me	28,2 (24,9—30,0)	23,3 (22,5—23,7)	0,003	29,4 (26,1—33,2)	0,650

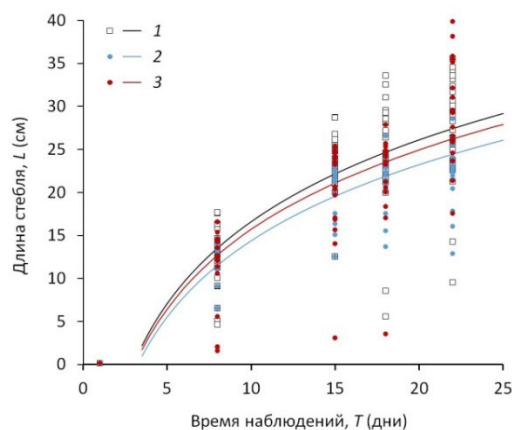
Примечание: n_a — число стаканчиков с 5 семенами в каждом; n_b — число растений; lim — интервал варьирования; M — средняя арифметическая; S — стандартное отклонение; Me — медиана (в скобках указаны доверительный интервал показателя, полученный методом бутстрепа); p — значимость отличий показателей для КОС от торфа (MCR-тест), полужирным шрифтом указаны значимые отличия.

Таблица 5. Скорость роста стеблей овса, логарифмическая модель $L = a \ln(T) - 15$

Table 5. Oats halms growth rate, logarithmic model $L = a \ln(T) - 15$

Наименование среды	n	a	lim	t	p	R^2	p_g
Торф	128	13,7	13,4—14,0	88,0	< 0,001	0,583	—
Субстрат 1	104	12,8	12,6—13,0	104,8	< 0,001	0,622	0,010
Субстрат 2	72	13,3	12,9—13,8	51,8	< 0,001	0,539	0,158

Примечание: a — средняя скорость роста стеблей; L — ожидаемая длина стебля (см); T — время (дни); n — число измерений растений; lim — доверительный интервал модельного параметра a (бутстреп-метод, процентиля); t — значение критерия Стьюдента; p — значимость отличий a от нуля; R^2 — коэффициент детерминации, p_g — значимость отличий a для КОС от торфа (MCR-тест), полужирным шрифтом указаны значимые отличия.



Примечание: маркеры указывают промеры стеблей, линии — тренды изменчивости показателя в каждом виде грунта, параметры моделей даны в таблице 5.

Рисунок 1. Динамика роста стеблей овса в разных видах субстрата: 1 — торф; 2 — субстрат 1; 3 — субстрат 2

Figure 1. Dynamics of oats halms growth in different substrates types: 1 – peat; 2 – substrate 1; 3 – substrate 2

Таблица 6. Всхожесть семян и длина стеблей сосны к концу эксперимента в разных видах субстрата

Table 6. Seeds germination and pine stems length by the end of the experiment in different substrate types

Показатели	Торф	Субстрат 1	p	Субстрат 2	p
Число проросших семян					
n_a	15	15	—	15	—
lim	1—5	2—5	—	2—5	—
M	3,6 (2,7—4,5)	3,3 (2,8—3,7)	0,591	4,2 (3,7—4,7)	0,294
S	1,7 (1,2—2,1)	0,9 (0,6—1,1)	< 0,001	0,9 (0,5—1,3)	0,013
Me	4,0 (2,0—5,0)	3,0 (3,0—4,0)	0,726	4,0 (4,0—5,0)	0,999
Длина стеблей растений, см					
n_b	62	51	—	53	—
lim	5,0—12,0	3,0—9,0	—	2,5—11,5	—
M	7,5 (7,2—7,9)	6,2 (5,9—6,5)	< 0,001	7,8 (7,3—8,3)	0,446
S	1,4 (1,2—1,7)	1,2 (0,9—1,4)	0,270	2,0 (1,7—2,4)	0,002
Me	7,5 (7,0—8,0)	6,5 (6,0—6,5)	< 0,001	8,0 (7,0—9,0)	0,851

Примечание: n_a — число стаканчиков с 5 семенами в каждом, другие обозначения даны в таблице 4.

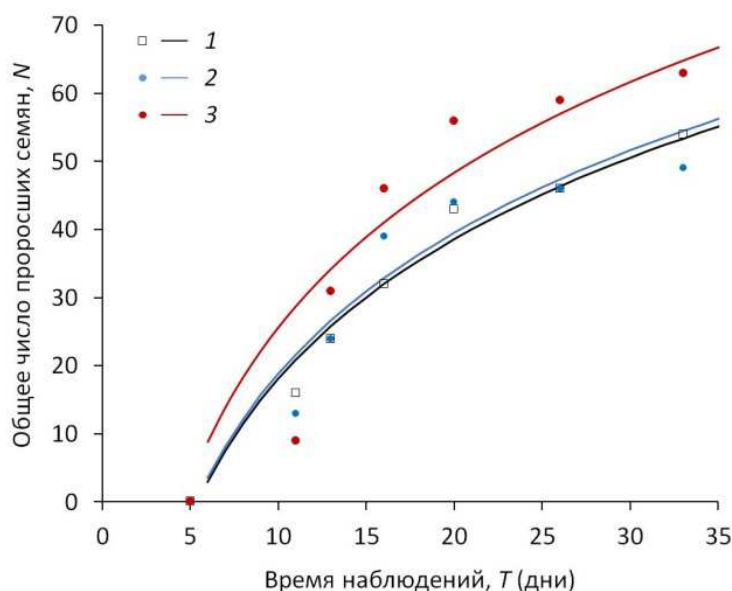


Рисунок 2. Динамика прорастания семян сосны в разных видах субстрата: 1 — торф; 2 — субстрат 1; 3 — субстрат 2: маркеры указывают промеры стеблей, линии — тренды изменчивости показателя в каждом виде грунта, параметры моделей даны в таблице 7

Figure 2. Dynamics of pine seed germination in different substrate types: 1 — peat; 2 — substrate 1; 3 — substrate 2: markers indicate measurements of stems, lines indicate trends in the variability of the indicator in each type of soil, model parameters are given in Table 7

Таблица 7. Скорость прорастания семян сосны, логарифмическая модель $N = a \ln(T) - 50$

Table 7. Germination rate of pine seeds, logarithmic model $N = a \ln(T) - 50$

Наименование среды	n	a	lim	t	p	R^2	p_g
Торф	7	29,6	29,0—30,4	40,9	< 0,001	0,911	
Субстрат 1	7	29,9	28,2—30,9	42,6	< 0,001	0,902	0,713
Субстрат 2	7	32,8	29,9—34,1	29,3	< 0,001	0,864	0,089

Примечание: a — средняя скорость прорастания семян, N — ожидаемое число проросших семян, T — время (дни), n — число дат измерений, другие обозначения даны в таблице 5.

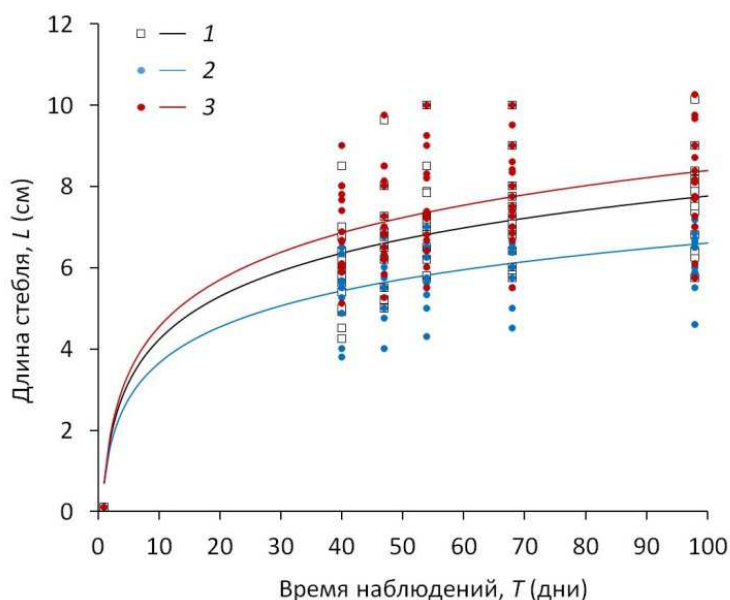


Рисунок 3. Динамика роста стеблей сосны в разных видах субстрата: маркеры указывают среднюю длину стеблей в каждом стаканчике, линии — тренды изменчивости показателя в каждом виде грунта, параметры моделей даны в таблице 8

Figure 3. The growth dynamics of pine stems in different substrate types: markers indicate the average length of stems in each cup, lines indicate trends in the variability of the indicator in each type of soil, model parameters are given in Table 8

Таблица 8. Скорость роста стеблей сосны, логарифмическая модель $L = a \ln(T) + 0.7$

Table 8. Pine stem growth rate, logarithmic model $L = a \ln(T) + 0.7$

Наименование среды	n	a	lim	t	p	R^2	p_g
Торф	76	1,53	1,47—1,59	48,9	< 0,001	0,428	
Субстрат 1	76	1,28	1,25—1,32	61,2	< 0,001	0,464	0,010
Субстрат 2	76	1,67	1,58—1,73	50,3	< 0,001	0,389	0,060

Примечание: a — средняя скорость роста стеблей; n — число измерений; варианты — средняя длина стеблей сосны в одном стаканчике, другие обозначения даны в таблице 5.

4. Обсуждение и заключение

Результаты исследований свидетельствуют о том, что плодородные свойства полученных субстратов значительно не отличаются от торфосмеси, подготовленной в заводских условиях. Плодородные качества в большей степени зависят от количества и состава

вносимых дополнительно компонентов на стадии формирования смеси для субстрата. Всхожимость и рост семян в субстрате, полученном в более короткий производственный срок, незначительно уступает сеянцам, выращенным в субстрате с длительным периодом изготовления. Это свидетельствует о том, что субстрат, полученный в короткий летний период, можно использовать для выращивания сеянцев в питомниках и повышения плодородия лесных почв при лесовосстановлении. Для предприятий лесной промышленности сокращение сроков производства субстратов обуславливает экономические эффекты и решает многолетнюю проблему сокращения образования неиспользуемых отходов. Полученные методом компостирования субстраты могут применяться как рекультивант при восстановлении нарушенных лесных территорий. Таким образом, изготовление почвенных субстратов позволит решить производственные проблемы накопления древесных отходов, включая некондиционные, и отходы длительного срока хранения.

Список литературы

1. Андреев А. А. Ресурсосбережение и использование отходов заготовки и переработки древесного сырья // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. 2014. № 10. С. 148—155.
2. Получение органоминеральных удобрений на основе древесной коры (обзор) / Е. В. Веприкова, С. А. Кузнецова, Н. В. Чесноков [и др.] // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. 2016. Т. 9, № 4. С. 414—429. DOI: <https://doi.org/10.17516/1998-2836-2016-9-4-414-429>.
3. Галдина Т. Е., Кулаков А. В., Ранцев-Картинов В. А. Переработка отходов лесозаготовительных и деревообрабатывающих предприятий в нетрадиционный мелиоративный субстрат с применением экологически чистых технологий // Лесотехнический журнал. 2021. Т. 11, № 2 (42). С. 24—34. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.2/3.
4. Графова Е. О., Паришин Н. В. Исследование методов обработки осадков сточных вод петрозаводских очистных сооружений // Resources and Technology. 2019. Т. 16, № 4. С. 94—118.
5. Дейнеко И. П., Фаустова Н. М. Элементный и групповой химический состав коры и древесины осины // Химия растительного сырья. 2015, Т. 1. С. 51—62.
6. Залесов С. В., Фролова Е. А., Лисина Е. И. Возможность использования нетрадиционных удобрений при выращивании посадочного материала в лесных питомниках // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2015. № 2 (34). С. 104—108.
7. Кайгородов Р. В. Влияние кородревесных отходов на биологическую активность техногенных поверхностных образований придорожных пространств // Успехи современного естествознания. 2019. № 11. С. 83—88.
8. Курило О. Н., Ширинкина Е. С., Вайсман Я. И. Способ использования ресурсного потенциала коры длительного срока хранения // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2014. № 1. С. 79—87.
9. Оценка уровня негативного воздействия на компоненты природной среды несанкционированной свалки у п. Самофаловка Волгоградской области /

- О. А. Мишустин, С. Б. Хантимирова, В. Ф. Желтобрюхов [и др.] // Инженерный вестник Дона. 2019. № 9. С. 50.
10. Мохирев А. П., Безруких Ю. А., Медведев С. О. Переработка древесных отходов предприятий лесопромышленного комплекса как фактор устойчивого природопользования // Инженерный вестник Дона — Северо-Кавказский научный центр высшей школы Южного федерального университета. 2015. № 2, ч. 2. 13 с.
 11. Мохирев А. П., Рубинская А. В., Мезенцева Н. В. Получение органических удобрений из отходов лесозаготовительной деятельности как способ повышения комплексного использования древесины // Международные научные исследования. 2015. № 3 (24). С. 147—151.
 12. Сергиенко А. В., Яцун И. В. Необходимость рационального использования отходов деревообработки // Наука и образование сегодня. 2017. № 1 (12). С. 12—13.
 13. Шитиков В. К., Розенберг Г. С. Рандомизация и бутстреп: статистический анализ в биологии и экологии с использованием R. Исп. и доп. интернет-версия от 15.11.2013. Тольятти: Кассандра, 2013. 314 с.
 14. The cover uncovered: bark control over wood decomposition / G. G. O. Dossa, D. Schaefer, J.-L. Zhang [et al.] // Journal of Ecology. 2018. No. 106. P. 2147—2160.
 15. Palviainen M., Finér L. Decomposition and nutrient release from Norway spruce coarse roots and stumps — a 40-year chronosequence study // Forest Ecology and Management. 2015. No. 358. P. 1—11. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2015.08.036>.
 16. R Core Team (2021). R: a language and environment for statistical computing. R version 4.1.2. (2021—11—01). Vienna: R Foundation for statistical computing, 2021. Available at: <http://www.r-project.org/> (accessed on: 01.03.2022). Text. Image: electronic.
 17. Van den Boogaart K. G., Tolosana-Delgado R., Bren M. Package ‘composition’. Compositional data analysis. 2022. Version 2.0—4. Available at: <https://cran.microsoft.com/web/packages/compositions/compositions.pdf>. (accessed on: 10.04.2022). Text. Image: electronic.

References

1. Andreev A. A. Resource saving and use of waste materials for harvesting and processing of wood raw materials. *Fundamental and applied research: problems and results*, 2014, no. 10, pp. 148—155. (In Russ.)
2. Veprikova E. V., Kuznetsova S. A., Chesnokov N. V., Kuznetsov B. N. Obtaining organomineral fertilizers based on tree bark (review). *Journal of the Siberian Federal University. Series: Chemistry*, 2016, vol. 9, no. 4, pp. 414—429. doi: <https://doi.org/10.17516/1998-2836-2016-9-4-414-429>. (In Russ.)
3. Galdina T. E., Kulakov A. V., Rantsev-Kartinov V. A. *Forest Engineering Journal*, 2021, vol. 11, no. 2 (42), pp. 24—34. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2021.2/3. (In Russ.)
4. Grafova E. O., Parshin N. V. Investigation of methods for treating sewage sludge from Petrozavodsk treatment facilities. *Resources and Technology*, 2019, vol. 16, no. 4, pp. 94—118. (In Russ.)
5. Deineko I. P., Faustova N. M. Elemental and group chemical composition of aspen bark and wood. *Chemistry of plant raw materials*, 2015, vol. 1, pp. 51—62. (In Russ.)
6. Zalesov S. V., Frolova E. A., Lisina E. I. Possibility of using non-traditional fertilizers when growing planting material in forest nurseries. *Bulletin of the Bashkir State Agrarian University*, 2015, no. 2 (34), pp. 104—108. (In Russ.)

7. Kaigorodov R. V. Influence of bark and wood waste on the biological activity of technogenic surface formations of roadside spaces. *Successes of modern natural science*, 2019, no. 11, pp. 83—88. (In Russ.)
8. Kurilo O. N., Shirinkina E. S., Vaisman Ya. I. A method of using the resource potential of the long-term storage bark. *Transport. Transport facilities. Ecology*, 2014, no. 1, pp. 79—87. (In Russ.)
9. Mishustin O. A., Khantimirova S. B., Zheltobryukhov V. F. [et al.] Assessment of the level of negative impact on the components of the natural environment of an unauthorized dump near the village of Samofalovka, Volgograd Region. *Engineering Bulletin of the Don*, 2019, no. 9, p. 50. (In Russ.)
10. Mokhirev A. P., Bezrukikh Yu. A., Medvedev S. O. Processing of wood waste from timber industry enterprises as a factor in sustainable nature management. *Engineering Bulletin of the Don-North Caucasian Scientific Center of the Higher School of the Southern Federal University*, 2015, no. 2, part 2. 13 p. (In Russ.)
11. Mokhirev A. P., Rubinskaya A. V., Mezentseva N. V. Obtaining organic fertilizers from logging waste as a way to increase the integrated use of wood. *International Scientific Research*, 2015, no. 3 (24), pp. 147—151. (In Russ.)
12. Sergienko A. V., Yatsun I. V. The need for rational use of woodworking waste. *Science and education today*, 2017, no. 1 (12), pp. 12—13. (In Russ.)
13. Shitikov V. K., Rozenberg G. S. *Randomization and bootstrap: statistical analysis in biology and ecology using R. Corrected and supplemented Internet version dated 11/15/2013*. Tolyatti, Kassandra, 2013. 314 p. (In Russ.)
14. Dossa G. G. O., Schaefer D., Zhang J.-L., Tao J.-C., Cao K.-F., Corlett R. T., Cunningham A. B., Xu J.-C., Cornelissen J. H. C., Harrison R. D. The cover uncovered: bark control over wood decomposition. *Journal of Ecology*, 2018, no. 106, pp. 2147—2160.
15. Palviainen M., Finér L. Decomposition and nutrient release from Norway spruce coarse roots and stumps — a 40-year chronosequence study. *Forest Ecology and Management*, 2015, no. 358, pp. 1—11. doi: <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2015.08.036>.
16. R Core Team (2021). R: a language and environment for statistical computing. R version 4.1.2. (2021—11—01). Vienna: R Foundation for statistical computing, 2021. Available at: <http://www.r-project.org/>. (accessed on: 01.03.2022). Text. Image: electronic.
17. Van den Boogaart K. G., Tolosana-Delgado R., Bren M. Package ‘composition’. Compositional data analysis. 2022. Version 2.0—4. Available at: <https://cran.microsoft.com/web/packages/compositions/compositions.pdf>. (accessed on: 10.04.2022). Text. Image: electronic.

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7003

УДК 630*232.325.21

Статья

Влияние пара в севообороте на качество семян

Тюкавина Ольга Николаевна

доктор сельскохозяйственных наук, доцент, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова»; ведущий научный сотрудник, ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства» (Российская Федерация), o.tukavina@narfu.ru

Демина Надежда Александровна

кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства» (Российская Федерация), sevniih@sevniih-arh.ru

Файзулин Даниял Ханбалович

младший научный сотрудник, ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства» (Российская Федерация), monitoringlesov@sevniih-arh.ru

Получена: 5 апреля 2023 / Принята: 13 июня 2023 / Опубликовано: 14 июня 2023

Аннотация: В настоящее время нарастает интерес к дифференцированному использованию посадочного материала, характеризующегося разными биометрическими свойствами, с целью повышения его жизнеспособности при пересадке. Для разработки программ выращивания посадочного материала под условия конкретной культурной площади необходима база данных, описывающая влияния разных комплексов факторов на габитус и виталитет семян. Наличие такой базы позволит разработать технологические схемы выращивания семян, рекомендуемые для применения в конкретных лесорастительных районах. В ходе предварительной оценки установлено, в что Северо-Западном регионе паровое поле вводится в севооборот лишь у 80 % постоянных питомников открытого грунта. Цель исследования состояла в оценке влияния пара в севообороте на качество семян. Оценивали двухлетние семена сосны и ели в постоянном питомнике открытого грунта Балтийско-Белозерского лесного района с классической технологией проведения работ. При отсутствии в технологической схеме выращивания пара отмечается низкий выход семян. Густота семян в 3,4 раза меньше по сравнению с полем, на котором парование проводилось. Включение в севооборот паровых полей позволяет сократить срок выращивания

сеянцев, особенно сосны. Количество сеянцев, достигших нормативных размеров на второй год развития, под влиянием пара возросло на 76 % у сосны, на 30 % у ели. Парование полей способствует большему развитию надземной части сеянцев обеих пород. Так, масса надземной части сосны возрастает на 65 %, а ели — на 125 %. Это ухудшает соотношение массы тонких корней и надземной части у сеянцев сосны. Низкие индексы выносливости и соотношение длины надземной и подземной частей отмечались у сеянцев, выращенных на полях, не подвергавшихся парованию, при достижении ими нормативных размеров можно рекомендовать их к посадке в засушливых условиях.

Ключевые слова: сеянцы; сосна; ель; пар; постоянный питомник открытого грунта

DOI: 10.15393/j2.art.2023.7003

Article

The effect of fallow in nursery rotation on the quality of seedlings

Olga Tyukavina

D. Sc. in agriculture, associate professor, Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, leading researcher, Northern research institute of Forestry (Russian Federation), o.tukavina@narfu.ru

Nadezhda Demina

Ph. D. in agriculture, senior researcher, Northern Research Institute of Forestry (Russian Federation), sevniilh@sevniilh-arh.ru

Danyal Fayzulin

research assistant, Northern Research Institute of Forestry (Russian Federation), monitoringlesov@sevniilh-arh.ru

Received: 5 April 2023 / Accepted: 13 Jun 2023 / Published: 14 Jun 2023

Abstract: Currently, the interest deepens in the differentiated use of planting material characterized by different biometric characteristics in order to increase its survivability when planting on a cultural area. To develop programs for growing planting material under the specified conditions of the cultural area, a database should be created to identify the influence of different sets of factors on the habitus and vitality of seedlings. Prerequisites for its creation arise in the absence of control and compliance with the growing seedlings technological schemes recommended for specific forest-growing areas. For example, a fallow field is introduced into nursery rotation only in 80 % of field permanent nurseries surveyed in the Northwest. The aim of the study was to assess the effect of fallow in nursery rotation on the quality of seedlings. Two-year-old pine and spruce seedlings were evaluated in a field permanent nursery of the Baltic-Belozersky forest district where a traditional work performance technology is applied. Unless fallow was included in the technological scheme of growing, a low yield of seedlings was noted. The density of seedlings was 3.4 times less compared to the fallow field. The inclusion of fallow fields in nursery rotations allowed shortening the period of growing seedlings, especially those of pine. The number of seedlings that reached the standard size in the second year of development on a fallow field increased by 76 % in pine and by 30 % in spruce. The fallowing of fields contributed to the greater

development of the aboveground part of seedlings in both pine and spruce. So the mass of the aboveground part of the pine increased by 65 % and of the spruce — by 125 %. This worsened the ratio of the mass of thin roots and the aboveground part of pine seedlings. Seedlings grown in fields without fallowing and characterized by the low degree of hardiness and the ratio of the length of the aboveground and underground parts when they reach the standard sizes can be recommended for planting in arid conditions.

Keywords: seedlings; pine; spruce; fallow; field permanent nursery

1. Введение

В современный период возрастает потребность в посадочном материале как для лесовосстановления с ориентацией на получение древесного сырья, так и для восстановления природной среды, создания и расширения насаждений для депонирования углерода. Жизнеспособность посадочного материала на лесокультурной площади можно повысить за счет учёта её лимитирующих факторов и направлений преодоления их при управлении технологией выращивания сеянцев. Устойчивость посадочного материала к ограничивающим факторам на лесокультурной площади можно сформировать не только методами подготовки участка, но и изменяя морфологические признаки сеянцев, применяя разные программы выращивания посадочного материала [1]. В связи с этим за рубежом активно разрабатывается концепция «целевое растение», или «целевой лес или сеянец» [2], [3]. Концепция целевого растения (TRC) начинается с трёх ключевых элементов, которые определяют циклический процесс улучшения: питомники должны работать вместе с клиентами; целевые растения определяются на месте посадки; качество, а не внешний вид, определяет успех [4]. Высота побега, диаметр корневой шейки, корневые системы и соотношение побега к корню являются показателями для прогнозирования потенциала роста в полевых условиях [5], поскольку они снижают уязвимость растений к стрессу за счёт регулирования водообмена. Большой диаметр корневой шейки и размер корневой системы повышают вероятность выживания и роста [2]. Для создания целевых программ выращивания сеянцев под конкретные условия их пересадки необходим каталог (база) закономерностей влияния антропогенно трансформируемых факторов на качественные характеристики посадочного материала. В современных условиях не во всех питомниках открытого грунта полностью реализуются агротехнические приёмы. Например, паровое поле в севооборот вводится лишь у 80 % постоянных питомников открытого грунта из обследованных по Северо-Западу. Следовательно, современный период позволяет создать научную базу по влиянию разных комплексов агротехнических приёмов или их отсутствия на морфологические характеристики сеянцев с целью дифференцированного выращивания посадочного материала, адаптированного к конкретным условиям культурной площади.

2. Материалы и методы

Цель исследования — оценка влияния пара в севообороте на качество сеянцев. Объект исследования — двухлетние сеянцы сосны и ели в постоянном питомнике открытого грунта Балтийско-Белозерского лесного района. Применялась общепринятая для данного типа питомника технология выращивания посадочного материала, которая включала следующие основные производственные операции: паровые поля 2—3 года (сидеральное и чистое) с внесением торфа, известкованием; культивация и боронование; внесение минеральных удобрений на паровых полях на первом, втором и третьем году выращивания сеянцев;

мульчирование посевов торфокрошкой; рыхление; борьба с сорняками; защита посадочного материала. Почвы среднекислые, механический состав — средний суглинок.

Одной из проблем питомников с эффективной агротехникой выращивания является наличие остатков нереализованного посадочного материала, который перерастает и утилизируется. В результате этого и возникла возможность оценить качество сеянцев, сформировавшихся в результате применения агротехники выращивания с паром и без пара.

Учёт сеянцев проводили в конце августа. Случайной выборкой отбирали до 100 сеянцев с поля. В камеральных условиях измеряли штангенциркулем диаметр стволика у шейки корня с точностью до 0,1 мм; линейкой — высоту сеянца с точностью до 0,1 см, длину осевого прироста первого, второго года (см), длину корня (см), длину главного корня (см), длину боковых корней (см). Сеянец разделяли на фракции: хвоя, ствол, корни с диаметром менее 1 мм, корни с диаметром более 1 мм. Фракции сушили в сушильном шкафу при температуре 105 °С до постоянного веса, охлаждали в эксикаторе с хлористым кальцием и взвешивали на электронных весах AF-220CE (точность $\pm 0,001$ г).

Индекс выносливости определяли как отношение высоты сеянца (см) к диаметру корневой шейки (мм) [6].

Индекс качества Диксона (DQI) [7] рассчитывали по формуле

$$DQI = \frac{A}{B+C},$$

где A — масса растения в воздушно-сухом состоянии (г); B — индекс выносливости; C — отношение массы надземной части растения к его подземной части в воздушно-сухом состоянии (г).

3. Результаты

Густота двухлетних сеянцев сосны на поле, в технологической схеме которого пар отсутствовал, составляет 130 ± 3 шт./м²; на поле, в технологической схеме которого пар присутствовал, — 444 ± 38 шт./м². Различие составило в 3,4 раза ($t = 8,3$ при $t_{st} = 2,7$, $p = 0,99$). На полях, не подвергавшихся парованию, выход сеянцев ели практически в 2 раза ниже нормативного. Низкая выживаемость сеянцев первого года обусловлена, прежде всего, полеганием. При отсутствии парования поля происходит накопление патогенов и вредителей в почве. Известкование кислых почв во время пара подавляет развитие возбудителей полегания сеянцев [8]. При паровании проводили борьбу с сорняками, которые не только ослабляют сеянцы, но и служат источником инфекции полегания и выпревания.

Доля сеянцев сосны, по размерам соответствующих требованиям стандарта, с поля, в технологической схеме которого пар отсутствовал, составляет 6 %; с паром — 82 %. Доля сеянцев ели, по размерам соответствующих требованиям стандарта, с поля, в технологической схеме которого пар отсутствовал, составляет 28 %; с паром — 58 %.

Следовательно, включение в севооборот паровых полей позволяет сократить срок выращивания семян, особенно сосны.

Парование полей способствовало большему развитию надземной части семян как у сосны, так и у ели (таблица). Высота семян сосны с поля, подвергнувшегося парованию, значительно больше по сравнению с полем без пара на 95 %, у ели — на 68 %; масса надземной части у сосны — на 65 %, у ели — на 125 %; масса хвои у сосны — на 51 %, у ели — на 77 %; масса стволика у сосны — на 100 %, у ели — на 60 %. При этом диаметр корневой шейки у сосны изменяется не так значительно (на 21 %), а у ели различие не значительно. На поле, которое подвергалось парованию, происходит вытягивание семян в высоту в связи с их большей густотой.

Аналогичные изменения отмечаются и с корнями, но менее интенсивно. Так, длина корня семян сосны с поля, подвергнувшегося парованию, значительно больше по сравнению с полем без пара на 38 %, у ели — на 27 %. Суммарная длина корней у сосны возрастает в данных условиях на 51 %, масса корней — на 55 %, а у ели различие не значительно. Изменения в надземной и корневой системе указывают на накопление в почве в процессе парования азота. Азот способствует росту побегов по сравнению с ростом корней, причём стебли прирастают большими темпами по сравнению с ассимиляционным аппаратом [9]. Этому способствует применение в качестве сидерата вико-овсяной смеси. Кроме этого, применение гербицидов ускоряет процессы минерализации и накопления подвижных форм азота [10].

Отношение длины надземной части семени к длине корня на полях, подвергнувшихся парованию, обусловлено густотой семян. В самых редких посевах длина корней в два раза больше высоты стволиков (соотношение 0,48), а в самых густых посевах корни даже короче надземной части семян (соотношение 1,03) [11]. Исходя из этого, можно отметить, что на полях, подвергнувшихся парованию, не происходит сильного переуплотнения семян, а с отсутствием пара семена можно охарактеризовать как очень редкие.

Отношение длины главного корня к суммарной длине боковых корней на полях, отличающихся по наличию пара в севообороте, на одном уровне как у сосны, так и у ели указывает на относительно равную разветвлённость корней и совпадение остальных агротехнических приёмов.

Потенциал роста семян отражает соотношение массы надземной части и корневой системы [12]. Особое внимание уделяется тонким физиологически активным корням с диаметром до 1 мм, осуществляющим ионный обмен катионами и анионами с почвенным раствором, в которых синтезируются активные вещества, необходимые для роста всех частей растений [13]. Для характеристики потенциальной возможности приживания растений допустимо использовать отношение массы тонких корней к массе надземной части или хвои [11—14]. Так, приживаемость семян 90 % при массе надземной части у одного растения в воздушно-сухом состоянии около 1 г отмечается при соотношении массы тонких корней к массе надземной части у сосны 1:8, у ели 1:13; приживаемость 70 % — у сосны 1:14, у ели 1:29 [13]. В отличие от посадочного материала сосны при одинаковой массе надземной

Таблица. Биометрические показатели двухлетних сеянцев хвойных пород

Table. Biometric indicators of two-year-old coniferous seedlings

Показатель	Сосна			Ель		
	С паром	Без пара	$t^*(t_{st} = 2,6, p = 0,99)$	С паром	Без пара	$t(t_{st} = 2,6, p = 0,99)$
Высота сеянца, см	$12,7 \pm 0,47$	$6,5 \pm 0,36$	10,5	$10,6 \pm 0,44$	$6,3 \pm 0,35$	7,7
Диаметр корневой шейки, мм	$2,3 \pm 0,08$	$1,9 \pm 0,08$	3,5	$1,8 \pm 0,06$	$1,5 \pm 0,08$	1,4
Индекс выносливости	$5,5 \pm 0,14$	$3,4 \pm 0,10$	12,2	$6,3 \pm 0,19$	$4,1 \pm 0,23$	7,4
Длина корня, см	$18,2 \pm 0,52$	$13,2 \pm 0,47$	7,1	$17,6 \pm 0,41$	$13,8 \pm 0,59$	5,3
Суммарная длина корней, см	$78,3 \pm 3,63$	$51,8 \pm 3,85$	5,0	$92,1 \pm 4,49$	$79,9 \pm 6,17$	1,6
Отношение длины надземной части к длине корня	$0,71 \pm 0,02$	$0,49 \pm 0,01$	10,0	$0,60 \pm 0,02$	$0,46 \pm 0,02$	2,5
Отношение длины главного корня к суммарной длине боковых корней	$0,33 \pm 0,02$	$0,41 \pm 0,03$	2,2	$0,27 \pm 0,01$	$0,28 \pm 0,02$	0,4
Масса надземной части сеянца, г	$0,89 \pm 0,07$	$0,54 \pm 0,07$	3,5	$0,54 \pm 0,03$	$0,24 \pm 0,02$	8,3
Масса хвои, г	$0,59 \pm 0,05$	$0,39 \pm 0,05$	2,9	$0,23 \pm 0,01$	$0,14 \pm 0,01$	6,4
Масса корней, г	$0,17 \pm 0,01$	$0,11 \pm 0,01$	4,3	$0,15 \pm 0,01$	$0,13 \pm 0,01$	1,4
Отношение массы тонких корней к массе надземной части	$1 : 10 \pm 0,72$	$1 : 7 \pm 0,42$	3,6	$1 : 4 \pm 0,52$	$1 : 3 \pm 0,27$	1,7
Отношение массы корней к массе надземной части	$0,21 \pm 0,02$	$0,21 \pm 0,008$	0,0	$0,42 \pm 0,01$	$0,55 \pm 0,02$	5,8
Отношение массы тонких корней к массе хвои	$0,19 \pm 0,01$	$0,24 \pm 0,02$	2,2	$0,59 \pm 0,02$	$0,84 \pm 0,06$	4,0
Количество ветвей	$0,98 \pm 0,14$	$1,29 \pm 0,16$	1,5	$3,51 \pm 0,34$	$2,92 \pm 0,41$	1,1
Отношение прироста второго года к приросту первого года роста	$1,58 \pm 0,09$	$1,39 \pm 0,07$	1,7	$1,75 \pm 0,07$	$1,74 \pm 0,07$	0,1
Индекс качества Диксона	$0,10 \pm 0,007$	$0,08 \pm 0,008$	1,9	$0,06 \pm 0,004$	$0,05 \pm 0,006$	0,8

*t — значимость различия.

части посадочный материал ели имеет хорошую приживаемость при гораздо худшем соотношении массы мелких корней и надземной части, что обусловлено способностью ели быстрее образовывать новые корневые окончания после пересадки [12]. У сосны, произрастающей на поле, подвергнувшись парованию, разрастание надземной части приводит к ухудшению данного соотношения (1:10), приживаемость такого посадочного материала составила бы 80 %, согласно вышеуказанным закономерностям. Ещё А. Р. Родин, В. В. Грибков и А. В. Никитина [15] указывали, что у сосны масса кроны нарастает быстрее, чем у других пород, но даже у лиственницы, которая растёт ещё быстрее, соотношение надземной и подземной частей более благоприятное для пересадки. Однако основная масса корневых окончаний высших порядков образуется и растёт в августе и сентябре (в сентябре в 3 раза больше, чем в августе) в Ленинградской области [16], осенью в Архангельской области [17], в то время как накопление сухого вещества хвоей прекращается, что позволяет предположить в нашем случае при оценке показателей в середине августа нормализацию данного соотношения в сентябре. По другим вариантам формируется по данному показателю качественный посадочный материал.

Отношение массы корней к надземной массе — менее информативный показатель качества сеянцев по сравнению с предыдущим. Однако при одинаковом соотношении между надземной частью и корневой системой приживаемость ниже у растений, имеющих меньшую массу надземной части [12]. По данным показателям сеянцы, выросшие на поле, подвергнувшись парованию, имеют больше шансов прижиться на лесокультурной площади.

Отношение массы тонких корней к массе хвои снижается у сеянцев, выросших на поле после пара, что указывает на большую физиологическую активность корней, позволяющих обслуживать большую поверхность хвои.

Соотношение линейных приростов второго и первого годов во всех случаях было значительно больше 1, т.е. на второй год сеянцы росли более интенсивно, чем в предыдущий год. Первый год роста наиболее экстремальный для сеянцев. Они подвергаются воздействию биологических, климатических стрессоров, большей частоте обработок пестицидами. На второй год развития влияние данных стрессоров не столь травматично при условии проведения всех агротехнических приёмов в первый год выращивания сеянцев.

Применение в технологической схеме пара оказало пролонгированное действие на рост сеянцев. У сеянцев сосны, выросших на поле после парования, линейный прирост и первого, и второго года роста больше практически в 2 раза по сравнению с сеянцами, в технологической схеме выращивания которых отсутствовал пар; у ели — в 1,35 раза. В то же время внесение органических мелиорантов перед посевом оказывает влияние на рост сеянцев в высоту преимущественно только на первом году жизни сеянцев [18].

Присутствие пара в технологической схеме выращивания сеянцев не повлияло на количество ветвей. Причём количество ветвей у двухлетних сеянцев ели в 3 раза больше,

чем у сосны, что может обуславливаться большей долей тонких корней (в 2,5 раза), приходящейся на наземную часть.

Для оценки жизнеспособности сеянцев при пересадке на культурную площадь используется индекс качества Диксона [7], [19—22]. Отмечается тенденция увеличения индекса качества Диксона у сеянцев, выросших на поле, которое подвергалось парованию. Значения индекса качества Диксона у сеянцев сосны и ели соотносятся с характеристиками сеянцев, выращиваемых в Финляндии [20].

Индекс выносливости понижен у сеянцев, выращенных на поле, которое не подвергалось парованию. Низкий коэффициент выносливости указывает на потенциал для лучшего роста в стрессовых условиях, главным образом при недостатке влаги [23]. Это также подтверждается и соотношением длины надземной и подземной частей сеянцев в данных условиях. Сеянцы со слаборазвитой надземной частью и хорошо развитыми корнями имеют большую выживаемость на засушливых территориях [7] за счёт снижения испаряющей поверхности. Однако, по данным ряда авторов [7], [24—26], общей мерой прочности сеянцев, устойчивости к засухе и тепловому воздействию являются диаметр шейки корня и масса корневой системы. Данные показатели значимо больше у сеянцев, выращенных на поле, которое подвергалось парованию.

Вопросы дифференцированного применения посадочного материала не новы, но не теряют своей актуальности [6], [7], [13], [14], [19], [20], [27]. Основные положения оценки качества и дифференцированного применения посадочного материала отражены в методических указаниях «Комплексная оценка качества посадочного материала и его применение на Европейском Севере» [14] и ОСТ 56-98-93 «Сеянцы и саженцы основных древесных и кустарниковых пород. Технические условия». Крупномерный посадочный материал характеризуется высокой устойчивостью к заглушению травянистой растительностью по сравнению со стандартными сеянцами, в связи с этим его высаживают на крупнотравных и злаковых вырубках кисличных и травянистых типов леса с наиболее плодородными почвами. На лишайниковых и вересковых вырубках или при посадке по пластам приживаемость лесных культур затрудняется из-за дефицита влаги, в связи с чем требуется посадочный материал с высоким отношением массы тонких корней к массе надземной части [14]. При посадке сеянцев в почвы с избыточным увлажнением длина корневой системы должна быть не менее 10 см, при нормальном увлажнении — 15 см; при недостаточном увлажнении — 20 см (ОСТ 56-98-93). Следовательно, сеянцы, выращенные на поле, которое не подвергалось парованию, при достижении нормативных размеров (для данного лесорастительного района высота 12 см, диаметр корневой шейки 2 мм), с данным соотношением надземной и подземной частей могут в дальнейшем быть рекомендованы к посадке на почвы с засушливыми условиями. Для сеянцев, выращенных согласно классической технологии, необходимо формировать условия, способствующие развитию корневой системы, в частности, путём снижения их густоты.

4. Обсуждение и заключение

Пар — важный элемент в технологической схеме выращивания сеянцев, способствующий оздоровлению почвы, борьбе с сорняками. На полях без пара отмечается низкая густота сеянцев. Включение в севооборот паровых полей позволяет сократить срок выращивания сеянцев, особенно сосны. Парование полей способствует большему развитию надземной части сеянцев, как у сосны, так и у ели, что может ухудшать соотношение массы тонких корней и надземной части сеянцев. Низкие индекс выносливости и соотношение длины надземной и подземной частей сеянцев, выращенных на полях, которые не подвергались парованию, при достижении ими нормативных размеров можно рекомендовать к посадке в засушливых условиях.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований. Регистрационный номер темы 122020100292-5.

Список литературы

1. Davis A. S., Pinto J. R. The Scientific Basis of the Target Plant Concept: An Overview // Forest. 2021. Vol. 12. P. 1293. DOI: 10.3390/f12091293.
2. Grossnickle S. C., MacDonald J. E. Seedling quality: history, application, and plant attributes // Forests. 2018. Vol. 9 (5). P. 283—305
3. Perumal M., Wasli M. E. Target Plant Concept (TPC): A Holistic Framework for Seedling Quality within a Forest Restoration Programme // Bulletin Institut Ekosains Borneo. 2023. Vol. 2, iss. 1. P. 35—40.
4. Meeting forest restoration challenges: using the target plant concept / K. R. Dumroese, T. D. Landis, J. R. Pinto [et al.] // Reforesta. 2016. Vol. 1. P. 37—52.
5. Establishment and growth of container seedlings for reforestation: a function of stocktype and edaphic conditions / J. R. Pinto, J. D. Marshall, R. K. Dumroese [et al.] // Forest Ecology and Management. 2011. Vol. 261 (11). P. 1876—1884.
6. Новикова Т. П., Малышева В. И., Петрищев Е. П. Влияние климатического индекса градусо-дней на виталитет 3-летних сеянцев сосны обыкновенной из сортированных по спектрометрическим свойствам семян // Лесотехнический журнал. 2022. Т. 12, № 1 (45). С. 110—118.
7. Ivetić V., Grossnickle S., Škorić M. Forecasting the field performance of Austrian pine seedlings using morphological attributes // iForest. 2016. Vol. 10. P. 99—107. DOI: 10.3832/ifor1722-009.
8. Минкевич И. И., Дорофеева Т. Б., Ковязин В. Ф. Фитопатология. Болезни древесных и кустарниковых пород: Учеб. пособие. СПб.: Лань, 2011. 160 с.
9. Van den Driessche R. Nursery growth of conifer seedlings using fertilizers of different solubilities and application time, and their forest growth // Canadian Journal of Forest Research. 1987. Vol. 18 (2). P. 172—180.
10. Маркова И. А., Жигунов А. В. Лесные культуры: агротехника выращивания посадочного материала в лесных питомниках. СПб.: СИНЭЛ; СПбГЛТУ, 2021. 134 с.
11. Юшка В. И., Градецкас А. И. Опыт выращивания сеянцев сосны и ели в теплице с полиэтиленовым покрытием. Каунас, 1970. 20 с.

12. Смирнов Н. А. Выращивание посадочного материала для лесовосстановления. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 169 с.
13. Калининченко Н. П., Писаренко А. И., Смирнов Н. А. Лесовосстановление на вырубках. М.: Экология, 1991. 384 с.
14. Пигарев Ф. Т., Беляев В. В., Сунгуров Р. В. Комплексная оценка качества посадочного материала и его применение на Европейском Севере. Архангельск: АИЛиЛХ, 1987. 14 с.
15. Родин А. Р., Грибков В. В., Никитина А. В. Оптимальное соотношение надземной биомассы посадочного материала и корневых систем хвойных пород // Лесохозяйственная информация. 1974. Вып. 15. С. 13—14.
16. Редько Г. И., Наквасина Е. Н. Некоторые вопросы сезонного развития двухлетних сеянцев сосны в связи с дифференциацией сроков проведения минеральных подкормок // Лесоводство, лесные культуры и почвоведение: Межвуз. сб. науч. тр. Л., 1981. С. 70—75.
17. Наквасина Е. Н. Сезонный рост сеянцев сосны и ели в условиях Архангельской области // Лесоводство, лесные культуры и почвоведение. Рациональное использование и восстановление лесных ресурсов: Межвуз. сб. науч. тр. Л., 1984. С. 74—77.
18. Ермакова М. В. Структура посадочного материала и качество древесины сосны при использовании органических мелиорантов // Лесотехнический журнал. 2018. № 4. С. 78—88.
19. Bian Z., Liu L., Ding S. Analysis of forest landscape restoration based on landscape connectivity: A case study in the Yi river basin, China, during 2015—2020 // Land. 2021. Vol. 10 (9). P. 904. DOI: 10.3390/land10090904.
20. Effect of biochar amendment on the properties of growing media and growth of containerized Norway spruce, Scots pine, and silver birch seedlings / E. Köster, J. Pumpanen, M. Palviainen [et al.] // Can. J. For. Res. 2020. Vol. 51. P. 31—40. DOI: 10.1139/cjfr-2019-0399.
21. Lin K.-H., Wu C.-W., Chang Y.-S. Applying Dickson quality index, chlorophyll fluorescence, and leaf area index for assessing plant quality of *Pentas lanceolata* // Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca. 2018. Vol. 47 (1). P. 169—176. DOI: 10.15835/nbha47111312.
22. Tsakalidimi M., Ganatsas P., Jacobs D. F. Prediction of planted seedling survival of five Mediterranean species based on initial seedling morphology // New Forests. 2012. Vol. 44. P. 327—339.
23. Johnson J. D., Cline M. L. Seedling quality of southern pines // Forest Regeneration Manual (Duryea ML, Dougherty PM eds). Kluwer, Dordrecht. The Netherlands, 1991. P. 143—162.
24. Mexal J. G., Cuevas Rangel R. A., Landis T. D. Reforestation success in central Mexico: Factors determining survival and early growth // Tree Planters' Notes. 2009. Vol. 53 (1). P. 16—22.
25. Effect of container type and seedling size on survival and early height growth of *Pinus palustris* seedlings in Alabama, USA / D. B. South, S. W. Harris, J. P. Barnett [et al.] // Forest Ecology and Management. 2005. Vol. 204. P. 385—398.
26. Ward J. S., Gent M. P. N., Stevens G. R. Effects of planting stock quality and browse protection-type on height growth of northern red oak and eastern white pine // Forest Ecology and Management. 2000. Vol. 127 (1—3). P. 205—216.
27. Сунгурова Н. Р., Дрочкова А. А. Биометрические характеристики посадочного материала как тест-показатель успешности культур *Pinus silvestris* L. // Известия вузов. Лесной журнал. 2021. № 4. С. 107—116.

References

1. Davis A. S., Pinto J. R. The Scientific Basis of the Target Plant Concept: An Overview. *Forest*, 2021, vol. 12, pp. 1293. doi: 10.3390/f12091293.

2. Grossnickle S. C., MacDonald J. E. Seedling quality: history, application, and plant attributes. *Forests*, 2018, vol. 9 (5), pp. 283—305.
3. Perumal M., Wasli M. E. Target Plant Concept (TPC): A Holistic Framework for Seedling Quality within a Forest Restoration Programme. *Bulletin Institut Ekosains Borneo*, 2023, vol. 2, iss. 1, pp. 35—40.
4. Dumroese K. R., Landis T. D., Pinto J. R., Haase D. L., Wilkinson K. W., Davis A. S. Meeting forest restoration challenges: using the target plant concept. *Reforesta*, 2016, vol. 1, pp. 37—52.
5. Pinto J. R., Marshall J. D., Dumroese R. K., Davis A. S., Cobos D. R. Establishment and growth of container seedlings for reforestation: a function of stocktype and edaphic conditions. *Forest Ecology and Management*, 2011, vol. 261 (11), pp. 1876—1884.
6. Novikova T. P., Malysheva V. I., Petrishchev E. P. Influence of the climatic index of degree-days on the vitality of 3-year-old seedlings of scots pine from seeds sorted by spectrometric properties. *Forestry Journal*, 2022, vol. 12, no. 1 (45), pp. 110—118. (In Russ.)
7. Ivetić V., Grossnickle S., Škorić M. Forecasting the field performance of Austrian pine seedlings using morphological attributes. *iForest*, 2016, vol. 10, pp. 99—107. doi: 10.3832/ifor1722-009
8. Minkevich I. I., Dorofeeva T. B., Kovyazin V. F. Phytopathology. *Diseases of tree and shrub species*. St. Petersburg, Lan, 2011. 160 p. (In Russ.)
9. Van den Driessche R. Nursery growth of conifer seedlings using fertilizers of different solubilities and application time, and their forest growth. *Canadian Journal of Forest Research*, 1987, vol. 18 (2), pp. 172—180.
10. Markova I. A., Zhigunov A. V. *Forest crops: agrotechnics of growing planting material in forest nurseries*. St. Petersburg, SYNEL; SPbSFTU, 2021. 134 p. (In Russ.)
11. Yushka V. I., Hradeckas A. I. *Experience of growing pine and spruce seedlings in a greenhouse with a polyethylene coating*. Kaunas, 1970. 20 p. (In Russ.)
12. Smirnov N. A. *Cultivation of planting material for reforestation*. Moscow, Forest Industry, 1981. 169 p. (In Russ.)
13. Kalinichenko N. P., Pisarenko A. I., Smirnov N. A. *Reforestation in cuttings*. Moscow, Ecology, 1991. 384 p. (In Russ.)
14. Pigarev F. T., Belyaev V. V., Sungurov R. V. *Comprehensive assessment of the quality of planting material and its application in the European North*. Arkhangelsk, Arkhangelsk Research Institute of Forest and Forest Chemistry, 1987. 14 p. (In Russ.)
15. Rodin A. R., Gribkov V. V., Nikitina A. V. Optimal ratio of aboveground biomass of planting material and root systems of coniferous species. *Forestry information*, 1974, iss. 15, pp. 13—14. (In Russ.)
16. Redko G. I., Nakvasina E. N. Some issues of seasonal development of two-year-old pine seedlings in connection with the differentiation of the timing of mineral fertilizing. *Forestry, forest crops and soil science. Intercollegiate collection of scientific papers*. Leningrad, 1981, pp. 70—75. (In Russ.)
17. Nakvasina E. N. Seasonal growth of pine and spruce seedlings in the conditions of the Arkhangelsk region. *Forestry, forest crops and soil science. Rational use and restoration of forest resources. Intercollegiate collection of scientific papers*. Leningrad, 1984, pp. 74—77. (In Russ.)
18. Ermakova M. V. The structure of the planting material and the quality of pine wood when using organic meliorants. *Forestry Journal*, 2018, no. 4, pp. 78—88. (In Russ.)

19. Bian Z., Liu L., Ding S. Analysis of forest landscape restoration based on landscape connectivity: A case study in the Yi river basin, China, during 2015–2020. *Land*, 2021, vol. 10 (9), pp. 904. doi: 10.3390/land10090904.
20. Köster E., Pumpanen J., Palviainen M., Zhou X., Köster K. Effect of biochar amendment on the properties of growing media and growth of containerized Norway spruce, Scots pine, and silver birch seedlings. *Canadian Journal of Forest Research*, 2020, vol. 51, pp. 31–40. doi: 10.1139/cjfr-2019-0399.
21. Lin K.-H., Wu C.-W., Chang Y.-S. Applying Dickson quality index, chlorophyll fluorescence, and leaf area index for assessing plant quality of *Pentas lanceolata*. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2018, vol. 47 (1), pp. 169—176. doi: 10.15835/nbha47111312.
22. Tsakalidimi M., Ganatsas P., Jacobs D. F. Prediction of planted seedling survival of five Mediterranean species based on initial seedling morphology. *New Forests*, 2012, vol. 44, pp. 327—339.
23. Johnson J. D., Cline M. L. Seedling quality of southern pines. *Forest Regeneration Manual* (Duryea ML, Dougherty PM eds). Kluwer, Dordrecht. The Netherlands, 1991, pp. 143—162.
24. Mexal J. G., Cuevas Rangel R. A., Landis T. D. Reforestation success in central Mexico: Factors determining survival and early growth. *Tree Planters' Notes*, 2009, vol. 53 (1), pp. 16—22.
25. South D. B., Harris S. W., Barnett J. P., Hainds M. J., Gjerstad D. H. Effect of container type and seedling size on survival and early height growth of *Pinus palustris* seedlings in Alabama, USA. *Forest Ecology and Management*, 2005, vol. 204, pp. 385—398.
26. Ward J. S., Gent M. P. N., Stevens G. R. Effects of planting stock quality and browse protection-type on height growth of northern red oak and eastern white pine. *Forest Ecology and Management*, 2000, vol. 127 (1—3), pp. 205—216.
27. Sungurova N. R., Drochkova A. A. Biometric characteristics of planting material as a test indicator of the success of *Pinus silvestris* L. cultures. *Russian Forestry Journal*, 2021, no. 4, pp. 107—116. (In Russ.)