

# ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал  
2024 Том 14 № 1 (53)

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» (ВГЛТУ)

**Председатель редакционной коллегии**

д.т.н., проф. М.В. Драпалюк

**Главный редактор**

д.т.н., проф. А.И. Новиков

**Состав редакционной коллегии**

д.с.-х.н., проф., академик РАН Н.Н. Дубенок (Россия)  
д.с.-х.н., гл. науч. сотр., академик РАН К.Н. Кулик (Россия)  
д.с.-х.н., проф., академик РАН А.А. Мартынюк (Россия)  
д.б.н., проф., чл.-корр. РАН А.А. Сири (Россия) 2012-2023  
д.т.н., проф. Д.Н. Афоничев (Россия)  
д.т.н., проф. Е.В. Агеев (Россия)  
д.т.н., проф. Л.И. Бельчинская (Россия)  
д.ф.-м.н., проф. Н.Н. Матвеев (Россия)  
д.б.н., проф. С.М. Матвеев (Россия)  
д.б.н., проф. А.А. Гусев (Россия)  
к.б.н., проф. К.В. Крутовский (Россия, Германия)  
д.э.н., проф. С.С. Морковина (Россия)  
д-р наук И. Ремеш (Чехия)  
д.т.н., проф. А.М. Цыпук (Россия)  
д.т.н., проф. В.А. Зеликов (Россия)  
д.т.н., проф. О.Н. Бурмистрова (Россия)  
д.т.н., проф. И.В. Григорьев (Россия)  
д.с.-х.н., проф. А.С. Манаенков (Россия)  
д.б.н., проф. В.В. Рубцов (Россия)  
д.т.н., проф. В.С. Сюнёв (Россия)  
д.б.н., проф. Н.Н. Харченко (Россия)  
д-р наук, ст. науч. сотрудник  
Клиссия Барбоза Мастранджело (Бразилия)  
д-р наук, проф. П. Тылек (Польша)  
д-р наук С.В. Ребко (Беларусь)  
проф. Дингво Чжоу (КНР)  
д-р наук, проф. А. Маркомини (Италия)  
д-р наук, проф. В. Подразски (Чехия)  
д-р наук, проф. Н. Билир (Турция)  
д-р наук, проф. Я. Седлячик (Словакия)  
д-р наук М. Ахмади-Афзади (Иран)  
д-р наук, проф. В. Иветич (Сербия)  
д-р наук, проф. Кью-Сак Кэнг (Республика Корея)  
д-р наук А. Монтагноли (Италия)  
д-р наук Янг Пэнг (КНР)  
д-р наук, проф. З. Говедар (Босния и Герцеговина)  
д-р наук, проф. А. Хэлуфи (Алжир)  
д-р наук, проф. К. Палагиану (Румыния)

**Редактор**

к.ф.н. Е.А. Прыткова

**Компьютерная верстка**

к.ф.н. Е.А. Прыткова

Журнал зарегистрирован  
Федеральной службой по надзору  
в сфере связи, информационных тех-  
нологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации  
ПИ № ФС77-66384 от 14.07.2016 г.

Материалы настоящего журнала  
могут быть воспроизведены только с  
письменного разрешения  
редакционной коллегии

РИО ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»  
394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8  
телефон (473) 253-72-90  
факс (473) 253-76-51  
e-mail: lesteh@vglta.vrn.ru

© ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», 2024

# ***LESOTEKHNICHESKII ZHURNAL***

Scientific Journal

**2024 Vol. 14 № 1 (53)**

Founder – Federal State Budget Educational Institution of High Education  
«Voronezh State University of Forestry and Technologies  
named after G.F. Morozov» (VSUFT)

**Editorial Board Head**

Dr., prof. M.V. Drapalyuk

**Editor-in-Chief**

Dr., prof. A.I. Novikov

**Members of editorial board**

- Dr., prof., RAS academician N.N. Dubenok (Russia)  
Dr., prof., RAS academician K.N. Kulik (Russia)  
Dr., prof. RAS academician A.A. Martynyuk (Russia)  
Dr., prof. A.A. Sirin (Russia) 2012-2023  
Dr., prof. D.N. Afonichev (Russia)  
Dr., prof. E.V. Ageev (Russia)  
Dr., prof. L.I. Belchinskaya (Russia)  
Dr., prof. N.N. Matveev (Russia)  
Dr., prof. S.M. Matveev (Russia)  
Dr., prof. A.A. Gusev (Russia)  
Dr., prof. K.V. Krutovsky (Russia, Germany)  
Dr., prof. S.S. Morkovina (Russia)  
Dr. J. Remes (Czech Republic)  
Dr., prof. V.A. Zelikov (Russia)  
Dr., prof. A.M. Tsypuk (Russia)  
Dr., prof. P. Tylek (Poland)  
Dr., prof. O.N. Burmistrova (Russia)  
Dr., prof. I.V. Grigoriev (Russia)  
Dr., prof. A.S. Manaenkov (Russia)  
Dr., prof. V.V. Rubtsov (Russia)  
Dr., prof. V.S. Syunev (Russia)  
Dr., prof. N.N. Kharchenko (Russia)  
Dr. Clissia Barboza Mastrangelo (Brazil)  
Dr. S.V. Rabko (Belarus)  
Prof. Zhou Dingguo (PRC)  
Dr., prof. A. Marcomini (Italy)  
Dr., prof. V. Podrazsky (Czech Republic)  
Dr., prof. N. Bilir (Turkey)  
Dr., prof. J. Sedliacik (Slovakia)  
Dr. M. Ahmadi-Afzadi (Iran)  
Dr., prof. V. Ivetic (Serbia)  
Dr., prof. Kyu-Suk Kang (Republic of Korea)  
Dr. A. Montagnoli (Italy)  
Dr. Yong Pang (PRC)  
Dr., prof. Z. Govedar (Republic of Srpska/B&H)  
Dr., prof. A. Kheloufi (Algeria)  
Dr., prof. C. Palaghianu (Romania)

**Editor**

PhD in Philology E.A. Prytkova

**Typesetting**

PhD in Philology E.A. Prytkova

The journal is registered by  
the Federal Service for Supervision  
of Communications, Information Tech-  
nology and Communications.

Registration certificate

PI № FS77-66384 of 14.07.2016

Materials of this journal may be repro-  
duced only with written permission of the  
editorial board

PS FSBEI HE «VSUFT»  
394087, Voronezh, Timiryazeva str., 8,  
telephone (473) 253-72-90,  
fax (473) 253-76-51,  
e-mail: lesteh@vglta.vrn.ru

© FSBEI HE «VSUFT», 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

### ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

**Р.Д. Петрин.** Индексы темпа роста и коэффициенты типа роста по высоте хвойных лесных насаждений (*на англ. языке*) 5

**Е.И. Семенова, А.О. Сорока, И.С. Недбаев.** Пространственная дифференциация лесов субъектов Российской Федерации на основе авторской методики оценки уровня адаптации к изменениям климата 16

**С.В. Третьяков, А.П. Богданов, И.В. Цветков, А.В. Давыдов, А.А. Карабан.** Моделирование роста производных сосняков брусничного типа леса разной густоты в Мурманской области 35

### ТЕХНОЛОГИИ.

#### МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

**Р.К. Калинин, М.В. Ивашнев, А.С. Васильев, Ю.В. Суханов.** К вопросу восстановления поврежденных пожарами лесных площадей 54

**А.Г. Князев.** Моделирование взаимодействия задних вырезных дисков лесного дискового плуга с почвой при работе на вырубках 81

**С.В. Фокин, П.Ю. Медведева, В.П. Попиков.** Анализ конструктивных особенностей привода рубильных машин для измельчения энергетического древесного сырья 95

**С.А. Чудинов.** Структурные прочностные характеристики фиброцементогрунта в дорожной одежде лесовозных автомобильных дорог Свердловской области 116

#### ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКА.

#### ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

**А.В. Артёмов, А.С. Ершова, А.Е. Шкуро, В.Г. Бурьдин.** Методика для оценки степени биоразлагаемости пластиков на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья без добавления связующих веществ 134

**Г.И. Мальцев, Ю.Л. Юрьев.** Применение винил- и винилиден-хлоридных латексов при изготовлении асбестового картона 151

## CONTENTS

### NATURE MANAGEMENT

**R.D. Petrin.** Growth-rate indices and coefficients of the types of growth in height of coniferous forest stands 5

**E.I. Semenova, A.O. Soroka, I.S. Nedbaev.** Spatial differentiation of forests in the Russian Federation based on the author's algorithm for assessing the level of adaptation to climate change 16

**S.V. Tretyakov, A.P. Bogdanov, I.V. Tsvetkov, A.V. Davydov, A.A. Karaban.** Modelling the growth of secondary cowberry pine forest of different densities in Murmansk region 35

### TECHNOLOGIES.

#### MACHINERY AND EQUIPMENT

**R.K. Kalinin, M.V. Ivashnev, A.S. Vasiliev, Y.V. Sukhanov.** On the issue of restoration of forest areas damaged by fires 54

**A.G. Knyazev.** Modeling the interaction of the rear cut-out discs of a forest disc plow with the soil when working in clearings 81

**S.V. Fokin, P.Y. Medvedeva, V.P. Popikov.** Analysis of design features of chipper drive for chopping energy wood raw materials 95

**S.A. Chudinov.** Structural strength characteristics of fiber cement soil in road pavement of logging roads in the Sverdlovsk region 116

#### WOOD PROCESSING.

#### CHEMICAL TECHNOLOGY

**A.V. Artyomov, A.S. Ershova, A.E. Shkuro, V.G. Buryndin.** Methodology for assessing the degree of biodegradability of plastics based on lignocellulose-containing raw materials without resins 134

**G.I. Maltsev, Y.L. Yuryev.** The use of vinyl and vinylidene chloride latexes in the manufacture of asbestos cardboard 151

- В.А. Мартынов, Д.О. Мясников, С.И. Рощина.** Исследование прочности и деформативности клееных деревянных балок с ламелями из термически поврежденной древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на основе планирования эксперимента 170
- V.A. Martinov, D.O. Myasnikov, S.I. Roshchina.** Investigation of the strength and deformability of glued wooden beams with lamellas made of thermally damaged (*Pinus sylvestris* L.) wood based on experimental planning 170
- Е.В. Томина, А.И. Дмитренко, Нгуен Ань Тьен, К.В. Жужукин, Н.А. Ходосова.** Гидрофобизация древесины *Betula pendula* Roth и *Pinus sylvestris* L. отработанным растительным маслом и возможности ее утилизации в биоугольный сорбент для ионов меди 190
- E.V. Tomina, A.I. Dmitrenkov, Nguyen Anh Tien, K.V. Zhuzhukin, N.A. Khodosova.** Hydrophobization of *Betula pendula* Roth wood and *Pinus sylvestris* L. wood with waste vegetable oil and the possibility of its utilization in a biochar sorbent for copper ions 190
- Л.В. Юртаева, Ю.Д. Алашкевич, Е.В. Каплёв, В.А. Патраков, Е.Р. Колосова.** Роль предгидролизного размола при получении микрокристаллической целлюлозы: на примере образцов биоповрежденной древесины *Picea abies*, *Larix sibirica* и *Populus tremula* 203
- L.V. Yurtaeva, Yu.D. Alashkevich, E.V. Kaplyov, V.A. Patrakov, E.R. Kolosova.** The role of prehydrolysis refining in obtaining microcrystalline cellulose: case of biodamage wood from *Picea abies*, *Larix sibirica* and *Populus tremula* species 203
- Е.В. Ющенко.** Магнитообработанный композиционный материал для производства фанеры на основе уплотненного шпона осины (*Populus tremula* L.) и комплексного связующего с нанокристаллической целлюлозой 219
- E.V. Yushchenko.** Magnetically processed composite material for the production of plywood based on compacted aspen veneer (*Populus tremula* L.) and a complex binder with nanocrystalline cellulose 219



Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/1>

УДК 630\*561



## Growth-rate indices and coefficients of the types of growth in height of coniferous forest stands

Rumen D. Petrin, ✉ [lesni4eja2014@gmail.com](mailto:lesni4eja2014@gmail.com)  <https://orcid.org/0000-0002-5831-5983>

Forest Research Institute in Bulgarian Academy of Sciences, 132, St. Kliment Ohridski Blvd., Sofia, 1756, Bulgaria

### Abstract

Based on data about the growth in height of different coniferous tree species, namely Scots and Austrian pines (*Pinus sylvestris* L. and *Pinus nigra* Arnold), Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and silver fir (*Abies alba* Mill.), have their growth rates within the same age range been investigated. New coefficients have been suggested for estimating their types of growth and the suitability of using these coefficients has been proved, as they have been compared with the Douhovnicov's zero natural indicators for the particular curves, and a high level of correlation has been found. The important parametric (qualitative) growth-rate curves, the curves of the normal numbers for the height growth of the four coniferous tree species are presented and analyzed, as well as the index curves. Further on, while applying the new growth-type coefficients, the values and ranges of the growth-rate indices have been found for the tree species investigated. It has been concluded that the growth-type coefficients, as well as the growth-rate indices, are tools quite comfortable and rather suitable for finding differences and similarities between the rates and types of the growth of forest stands.

**Keywords:** growth rate, growth type, stand-quality level, coniferous stands, tree species

**Funding:** this research received no external funding.

**Acknowledgments:** author thank the reviewers for their contribution to the peer review.

**Conflict of interest:** the author declares no conflict of interest.

**For citation:** Petrin R. D. (2024). Growth-rate indices and coefficients of the types of growth in height of coniferous forest stands. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 1 (53), pp. 5-15. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/1>.

**Received** 17.01.2024. **Revised** 28.02.2024. **Accepted** 29.02.2024. **Published online** XX.XX.2024.

## Индексы темпа роста и коэффициенты типа роста по высоте хвойных лесных насаждений

Румен Димитров Петрин ✉ [lesni4eja2014@gmail.com](mailto:lesni4eja2014@gmail.com)  <https://orcid.org/0000-0002-5831-5983>

Научно-исследовательский институт леса Болгарской академии наук, бул. Климента Охридского, 132, г. София, 1756, Болгария

На основании данных о росте по высоте различных пород хвойных насаждений: сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), сосны черной (*Pinus nigra* J.F. Arnold), ели обыкновенной (*Picea abies* (L.) H. Karst.) и пихты белой (*Abies alba* Mill.) – изучена скорость (или, темп) их роста в одном и том же возрастном интервале. Предло-

жены новые коэффициенты для оценки типа роста и доказана их пригодность к использованию, для чего их сопоставили с нулевыми натуральными показателями Духовникова для отдельных кривых с высокой степенью корреляции. Далее путем применения новых коэффициентов по типу роста были установлены значения и интервалы показателей скорости роста насаждений исследуемых пород. Коэффициенты типа роста, как и индексы темпа роста, являются достаточно удобным инструментом для установления различий и сходства в скорости роста и типе насаждений.

**Ключевые слова:** индексы темпа роста, коэффициенты типа роста, бонитет, хвойные породы деревьев.

**Финансирование:** данное исследование не получало внешнего финансирования.

**Благодарности:** автор выражает благодарность рецензентам за вклад в экспертную оценку статьи.

**Конфликт интересов:** автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Петрин, Р. Д. Индексы скорости роста и коэффициенты типа роста по высоте хвойных лесных насаждений / Р. Д. Петрин // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 1 (53). – С. 5–15 (на англ. яз.) – Библиогр.: с. 14–15 (26 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/1>.

*Поступила* 17.01.2024. *Пересмотрена* 28.02.2024. *Принята* 29.02.2024. *Опубликована онлайн* 20.03.2024.

### Introduction

The rates and types of forest stands' growth, available within each stand-quality level, are factors found long ago when studying this growth. The more important inferences from the studies of these matters by different authors have been presented in our dissertation (R. Petrin, 1988) entitled: Regularities of the Growth of Beech Stands and Using These in Forest-Management Planning. These inferences pertain mainly to: the availability of different types of growth of forest stands composed of almost all tree species, the relationship between growth rate and site conditions, and the differences in the productivities of stands of different types – the more productive stands within one and the same stand-quality level are those whose growth type is Ty – the type with an increasing growth rate corresponding to a late climax of increment.

The indicated studies (Davidov, 1977, 1980 and 1984; Douhovnikov and Iliev, 1972, Douhovnikov and Bogdanov, 1979, Douhovnikov, 1980; Mihov, 1983, 1984 and 1986 and Petrin, 1988) prove the necessity for composing differentiated growth tables and passing from static to dynamic identification of stand-quality levels, where not only these levels but also the types of growth are identified. Similar findings of different authors have provided the basis of composing growth-rate and stand-quality-level tables differentiated according to

growth types as, for example, those for Scots pine, Norway spruce and silver fir (Douhovnikov and Iliev, 1972), beech (Petrin, 1988) etc. Suggested have also been indices for identifying the types of growth of stands in forests (Mihov, 1986; Petrin, 1988 and Mihov and Petrin, 1996), on the basis of their relationship with the zero natural indicators (Douhovnikov, 1966).

Kyle W. Tomlinson et al., 2014, have found out that the growth rates of coniferous species are higher than those of deciduous ones.

Yeongwan Seo, Daesung Lee & Jungkee Choi, 2017, have compared the rates of the growth in breast-height diameter, average height, and volume of stands of three species: *Pinus densiflora*, *Pinus koraiensis* and *Larix kaempferi*; they have found out that, under all other conditions equal, the Japanese larch (*Larix kaempferi* /Lk/) has demonstrated the best rate of the growth in height and volume.

Jarosław Socha, Louisa Timinska-Chabanska et al., 2020, have found out for the main forest-forming species in Poland that the curves of the stand-quality-level classes of the young and old stands investigated deflect to the utmost extent from their average aspects.

Facundo J. Oddi, Cecilia Casas et al., 2022, have found out about Chilean cedar (*Austrocedrus chilensis*) that it thrives better on moist and cool sites, where there is more carbon in the soil and less oxidation.

Diego Rodríguez de Prado, Jose Riofrío et al., 2022, have investigated the structures in height of pure and mixed coniferous and deciduous stands and have found that the pure coniferous stands reach a higher average height than the mixed ones, and it is just the opposite with the deciduous ones – the mixed ones grow better. Models have been developed of height curves for different mixed stands with different soil moisture.

This paper has been intended to theoretically present and apply into practice two, new methodological approaches, as well as to introduce two, new parameters of growth curves: growth-rate indices (Petrin, 2021) and height-growth-type coefficients for of model forest stands of Scots and Austrian pine, Norway spruce and silver fir. The rates and types of the growth in height are investigated most often as the growth in height is a determining factor of the wood-production process. However, these indicators of the rate and type of growth can also be applied for every other curve of growth or structure of forest stands as all these curves are similar and usually have parabolic shapes.

## Materials and Methods

The following published works have been used as sources of data for the investigation:

- Published data on the growth in height and on the stand-quality levels of Scots pine stands (A. Tyurin, Poryazov, Tonchev and Dobrichov, 2004);

- Published data on the growth in height and on the stand-quality levels of Austrian pine stands (C. Nedyalkov, Krustanov and Raykov, 2004);

- Published data on the growth in height and on the stand-quality levels of Norway spruce stands (Nedyalkov, Poryazov, Tonchev and Dobrichov, 2004);

- Published data on the growth in height and on the stand-quality levels of silver fir (Shikov, Poryazov, Tonchev and Dobrichov, 2004).

The work examines model stands of four coniferous tree species, namely: white pine (*Pinus sylvestris* L.), black pine (*Pinus nigra* J.F. Arnold), spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.) and silver fir (*Abies alba* Mill.). For each tree species, data were used on the course of height growth of one stand from seven Stand-quality level (Ia, I, II, III, IV, V and Va), or a total of 28 stands.

We are going to briefly present the contents of the concepts rate and type of growth and indicators of identifying these.

The rate of growth is the steepness of the curve expressing the growth in height, or in another forest-mensuration characteristic, which shows how quickly height increases with age, and it is estimated by means of growth-rate indices (Petrin, 2021). In Western literature, the steepness of growth curves is called rate of growth, or growth trend (Mario Trouillier et al., 2020).

Growth-rate indices ( $I_{gr,r}$ ) are relative numbers of the studied growth curves obtained in a certain way. Let us consider the height growth of a forest stand, the growth rate of which is the subject of the present study, and let the average age of height growth be from 20 to 100, 110, and more years. Then, the curve of growth in height for this stand (i) is reduced to a relative expression with respect to the height (H) at an initial age  $x=\alpha$ , and the curve of normal numbers -  $q_{xi}$  is obtained, according to the equation:

$$q_{xi} = H_{xi} / H_{\alpha}, \quad (1)$$

where  $H_{xi}$  is the height at a given age  $x$ .

At  $\alpha=30$ , the equation takes the form:

$$q_{xi} = H_{xi} / H_{30} \quad (2)$$

Then, the value of  $q_{xi}$  in 100 years ( $q_{100}$ ) will be the height-growth rate index ( $I_{gr,r}$ ) of the stand:

$$I_{gr,r} = H_{100} / H_{30} \quad (3)$$

In general, equation (3) can be written in the form:

$$I_{gr,r} = H_{\Omega} / H_{\alpha} \quad (4),$$

where  $H_{\Omega}$  is one of the heights at the end of the investigated age range, and  $H_{\alpha}$  is the height at the beginning of this age range.

To make it possible to compare, when investigating one or more aggregates of curves, the growth-rate indices have to be calculated within one and the same age range. The best such range is the one 30÷100 years, but it can also be another.

The type of growth, in its turn, is the range that is part of the total range of the growth-rate curves. The rates of growth and the respective types of growth were identified up to now through the natural indicators method (NIM) of Douhovnikov, 1966. With it, the lower the zero natural indicator is the higher the rate of growth is. The zero natural indicators of the growth in height are most often obtained with values from 0.6 to 1.4, and in all situations the value of 1 divides the aggregate of growth curves into types of growth. The zero natural indicator is the linear, or free, coefficient  $b$  of the straight line, which is obtained, or which approximates the obtained parabolic curve when all the relative curves ( $q_x$ ) of the investigated aggregate are divided by their average curve-  $q_{xav}$ :

$$q_x/q_{xav} = ax + b, \quad (5)$$

where  $x$  stands for age, and  $a$  and  $b$  – for the coefficients of the straight line.

In the present study, it has been suggested for the first time to determine the type of growth by means of coefficients for the type of growth. The growth-type coefficient is a ratio of the growth-rate indices (2) for a particular aggregate of stands, or trees, to their average value –  $I_{gr\,rav}$ , or:

$$C_t = I_{gr\,r}/I_{gr\,av}. \quad (6)$$

The correlation method and graphical approximation were used to compare the zero natural indicators calculated for each stand and the growth type coefficients.

The possible types of growth are the following ones:

$T_{inc}$  Type – a growth type with an initially low growth rate that later increases – a type of increasing growth with a LATE climax of the increment. To it correspond the curves ( $H_A$ ) of higher growth-rate indices ( $I_{gr\,r}$ ), of lower zero natural indicators (ZNI), as well as of coefficients of the  $K_{tip}$  type – higher than 1.0.

$T_d$  Type – a growth type with an initially high growth rate that gradually abates – a type of decreasing growth rate, with an EARLY climax of the increment, where the curves are characterised by lower indices of the growth rate, higher zero natural indicators (ZNI) and growth-rate coefficients lower than 1.0.

$T_{us}$  Type – usual, or average type, which is not always differentiated. The growth-rate indices for the average type have average values, and the indicators of the types of growth (the zero natural indicators and the growth-type coefficients) have values around 1.

## Results and Discussion

### 1. Relationship between the growth-rate indices, zero natural indicators and growth-type coefficients for the coniferous tree species

Table 1 presents the rows of indices of the rates of growth in height, growth-type coefficients and zero natural indicators according to stand-quality levels and tree species.

Table 1

Growth-rate indices ( $I_{gr\,r}$ ), growth-type coefficients ( $C_t$ ), zero natural indicators and correlation coefficient indicative of growth type

Tree species	Indicators of rate and type of growth	Stand-quality levels								Correlation coefficient (R) $C_t \div$ ZNIs
		Ia	I	II	III	IV	V	Va	Average indicators	
Scots pine	$I_{gr\,r}$	2.35	2.44	2.47	2.59	2.60	2.78	3.03	2.54	-0.99
	$C_t$	0.93	0.96	0.97	1.02	1.02	1.09	1.19	1.00	
	ZNI	1.09	1.07	1.05	0.95	0.96	0.89	0.73	1.00	
Austrian pine	$I_{gr\,r}$	-	1.84	1.87	1.97	2.11	2.24	-	2.01	-0.99
	$C_t$	-	0.91	0.93	1.00	1.05	1.12	-	1.00	
	ZNI	-	1.31	1.23	1.00	0.80	0.64	-	1.00	
	$I_{gr\,r}$	-	3.56	3.90	4.39	4.82	5.00	-	4.33	-0.99

Tree species	Indicators of rate and type of growth	Stand-quality levels								Correlation coefficient (R) Ct÷ ZNIs
		Ia	I	II	III	IV	V	Va	Average indicators	
Norway spruce	Ct	-	0.82	0.90	1.01	1.11	1.15	-	1.00	
	ZNI	-	1.36	1.15	0.97	0.83	0.68	-	1.00	
Silver fire	I <sub>gr r</sub>	-	4	4.62	4.66	4.77	5.25	-	4.66	-0.99
	Ct	-	0.86	0.99	1.00	1.02	1.13	-	1.00	
	ZNI	-	1.28	1.02	0.99	0.94	0.77	-	1.00	
Generally	I <sub>gr r</sub>	-	2.96	3.22	3.40	3.58	3.82	-	3.38	-0.99
	Ct	-	0.89	0.95	1.01	1.05	1.12	-	1.00	
	ZNI	-	1.25	1.11	0.98	0.88	0.74	-	1.00	

Source: own calculations

One can see in Table 1 that the values of the indicators of the growth type – the growth-type coefficients and the zero natural indicators – coincide around the value of 1, which stands for about Stand-Quality Level III. The values of the growth-rate indices within each particular stand-quality level increase with the increase in the shade tolerance of the tree species – from Austrian pine through Scots pine toward Norway spruce and silver fir. This same trend as to an increase is also observed with the decrease in the stand-quality-level class: the growth rate increases within the range of each tree species (TS) and generally for all the tree

species. Therefore, the more shady and moist, or worse, the growth conditions are, the steeper the curve of the growth in height is. The coefficient of the correlation R between the zero natural indicators (ZNIs) and Ct is very high – about 1.0.

Figure 1 graphically shows the relationship between these two indicators as the stand-quality-level class becomes lower. The relationship is in a direct ratio and inverse proportion. Therefore, the coefficients for the types of growth are entirely suitable to use for determining the types of growth.

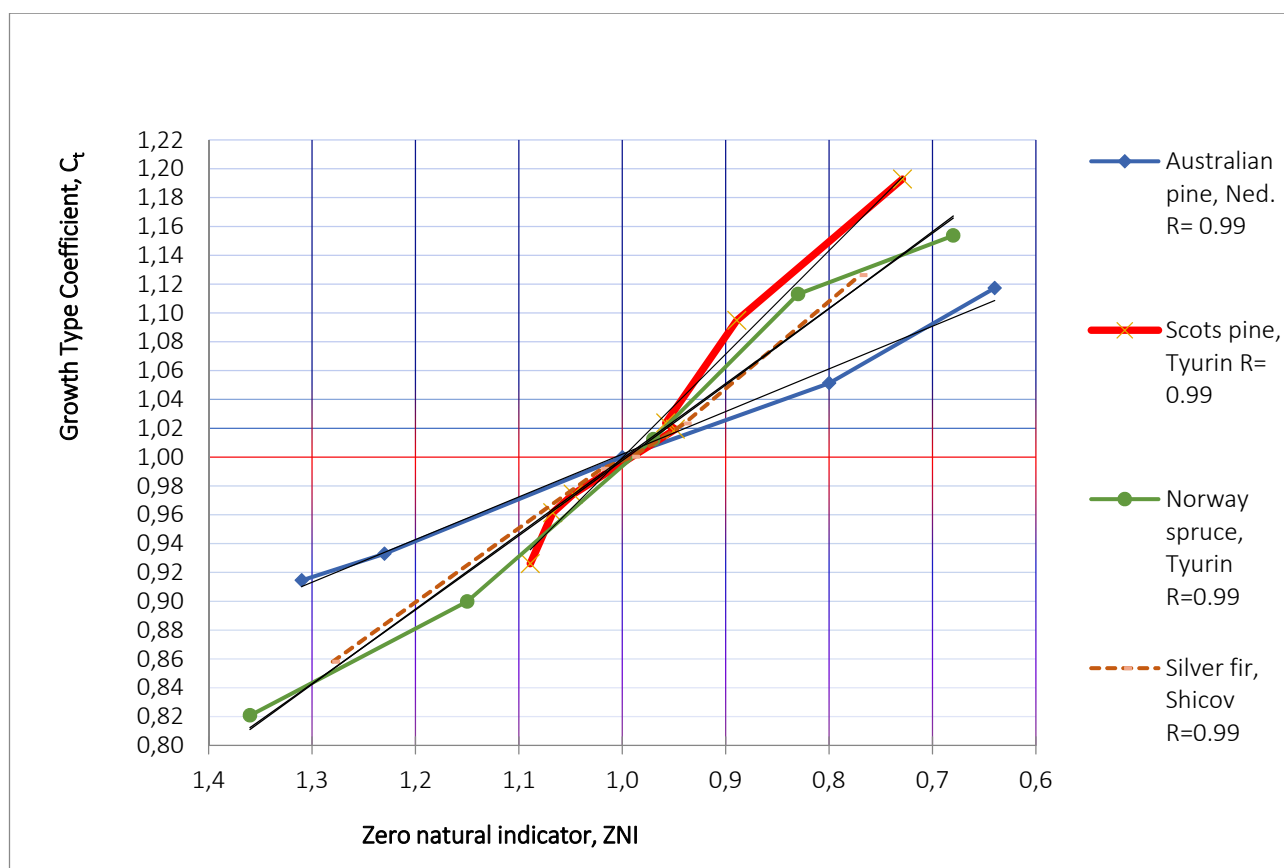


Figure 1. Relationship between zero natural indicators (ZNi) and height-growth-type coefficients (Ct) for the coniferous tree species with the decrease in stand-quality level

Source: author's composition

The average intervals of the zero natural indicators (ZNi) and the growth-type coefficients (Ct) are  $1.3 \div 0.7$  and  $0.85 \div 1.15$ , respectively, and the maximal ones -  $1.4 \div 0.6$  and  $0.8 \div 1.2$ .

For each of the ranges of both indicators, their first halves, i.e. up to 1.0, pertain to  $T_d$  growth type, and their second ones – to  $T_{inc}$  growth type.

2. Average relative curves ( $q_{xi}$ ), and index curves of height growth rate

Table 2 and Figure 2 present the average relative height growth curves ( $q_{xi}$ ) – also called normal number curves – for tree species (Equation 2), which clearly shows the difference in steepness. They are extremely convenient for comparative qualitative studies of the growth, increment, and structure of forest stands (Duhovnikov, 1966, Mihov, 2005, Petrin, 1988, 2021, 2022).

Table 2

Average relative curves for growth in height ( $q_{xi av.}$ ) according to tree species

Tree species	Age, years								
	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Scots pine	0.66	1.00	1.33	1.62	1.87	2.09	2.26	2.41	2.54
Austrian pine	0.64	1.00	1.29	1.49	1.65	1.80	1.89	1.95	2.01
Norway spruce	0.54	1.00	1.49	2.08	2.66	3.20	3.64	4.02	4.33
Silver fir	0.51	1.00	1.60	2.32	2.96	3.48	3.95	4.31	4.66

Source: own calculations

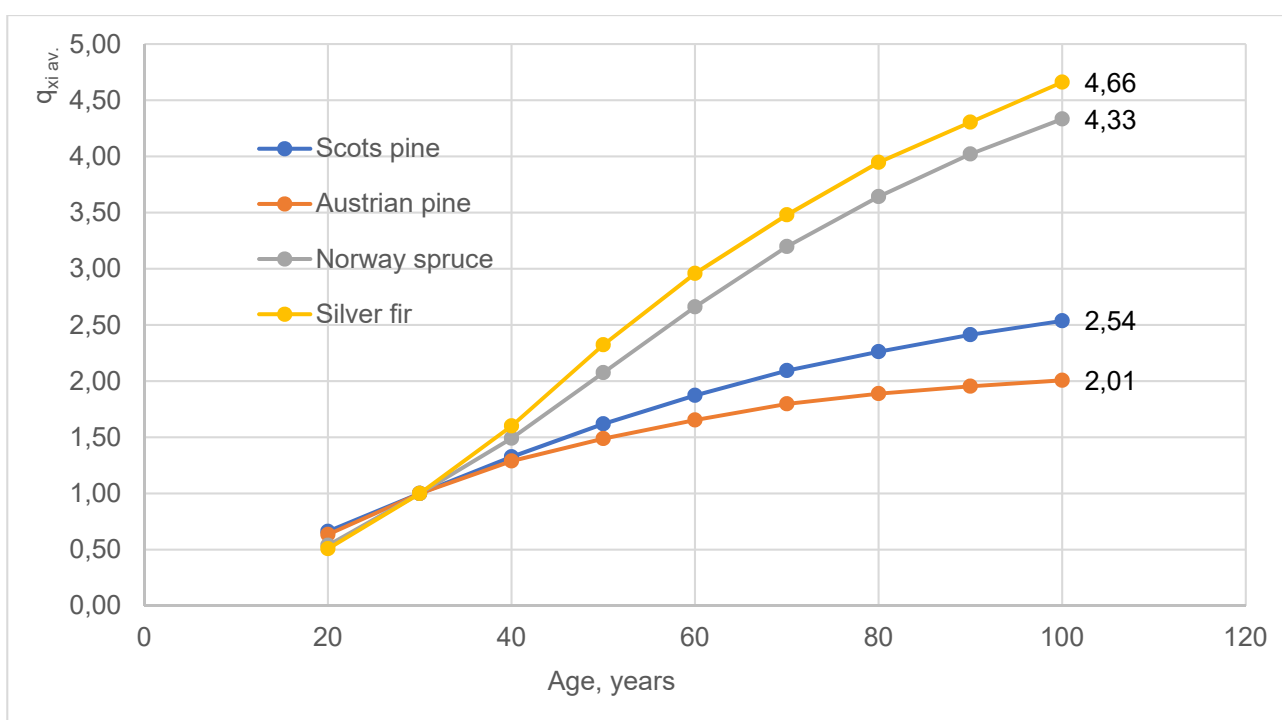


Figure 2. Average relative curves for growth in height ( $q_{xiav.}$ ) according to tree species  
Source: author's composition

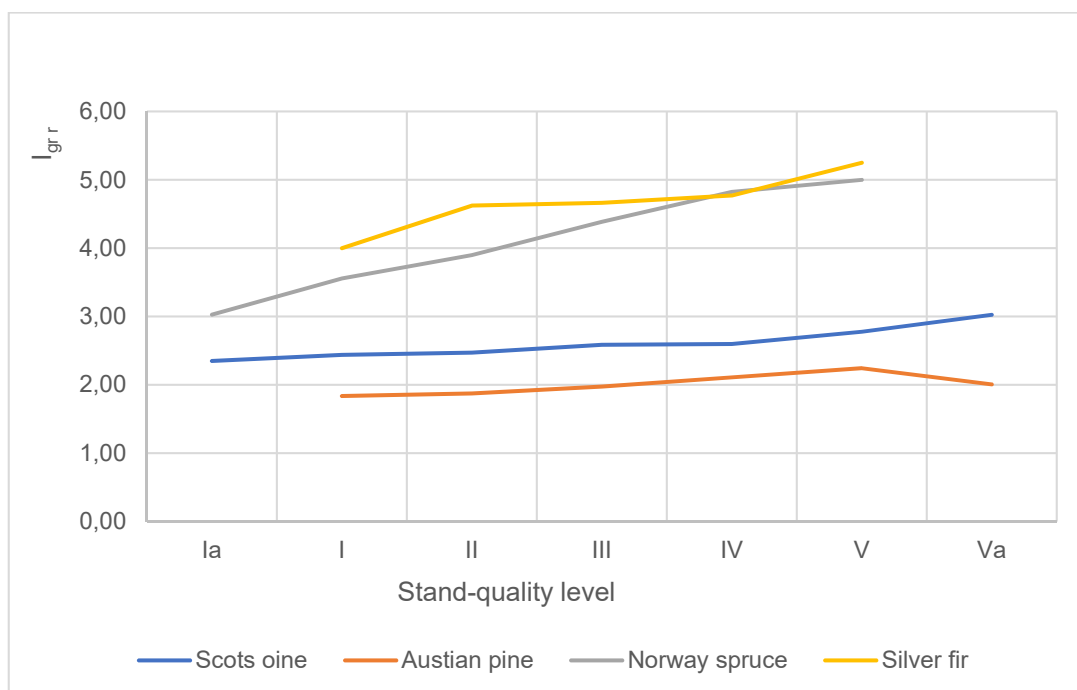


Figure 3. Curves of growth-rate indices according to height and tree species  
Source: author's composition

Figure 3 shows the index curves for the growth rate of the four coniferous tree species depending on Stand-quality level.

The location of the index curves in Figure 3, as well as the data from Table 1, make it possible to see the differences in the values of the growth rates of Scots pine, Austrian pine, Norway spruce and Silver fir. As previously found for conifer species (Yeongwan Seo, Daesung Lee & Jungkee Choi, 2017) and broadleaf species (Petrin, 2021), growth rate increases with increasing shade tolerance of tree species. The Silver fir index curve is located at the top, followed by the same one for Norway spruce, Scots pine and Austrian pine.

The same tendency towards an increase in growth rate indices is observed when the stand-quality level is lowered, i.e. the growth rate more or less increases for all tree species.

### 3. Growth-Rate Index Values for the Coniferous Tree Species according to Growth Types

Figure 4 shows the growth-rate indices according to tree species with the decrease in the stand-quality-level class depending on the growth-type coefficients. The indices' straight lines ascend within the stand-quality-level ranges, and the indices according to growth types have clearly been illustrated.  $T_{us} Ct = 1.0$  from the abscissa does the average index,  $I_{gr\ av.}$ , correspond.

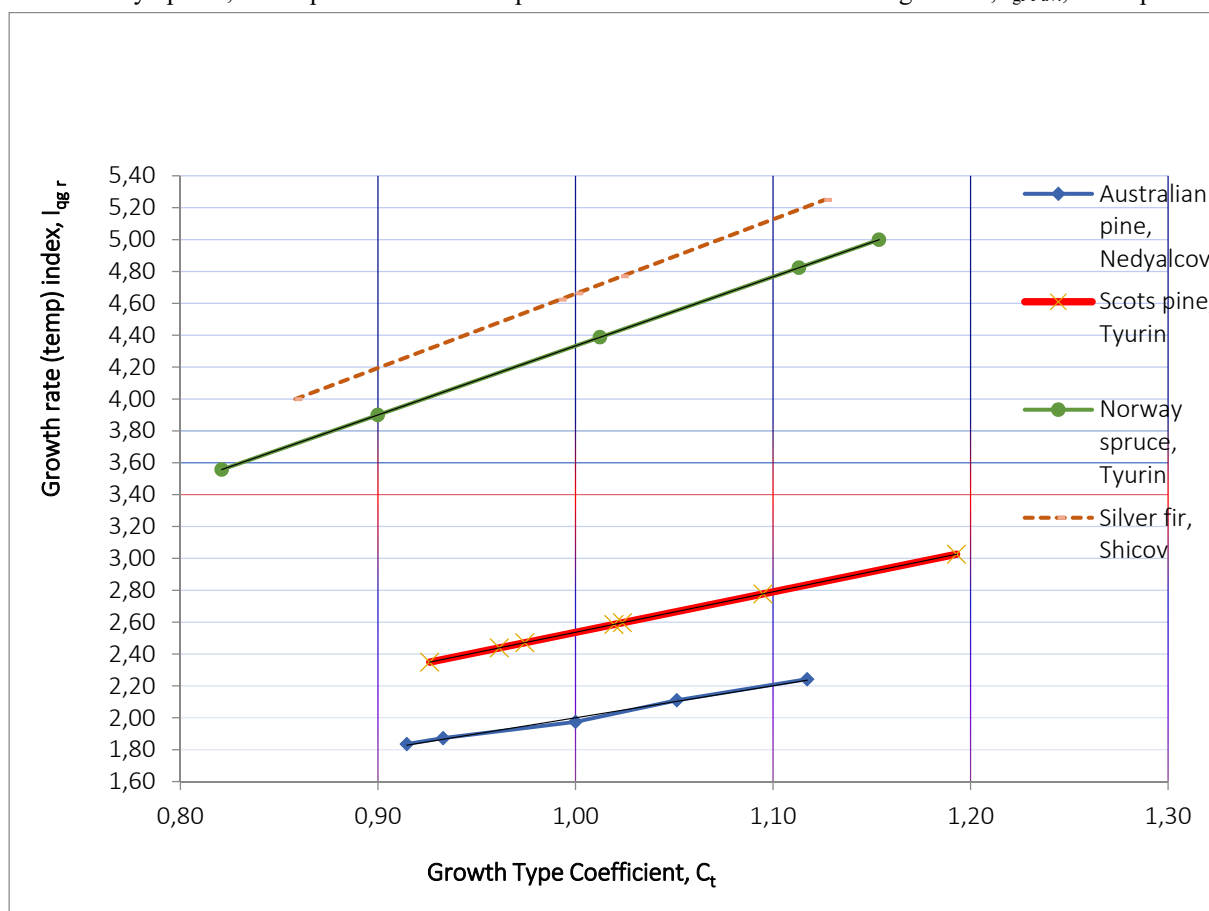


Figure 4. Relationship between the Growth-Type Coefficients for the Coniferous Tree Species ( $C_t$ ) and the Growth-Rate Indices ( $I_{gr}$ ) with the Decrease in Stand-Quality Level



The ranges of the growth-rate indices according to growth types and their respective average values have been presented in Table 3.

Table 3  
Index Ranges and Average Values of the Growth-Rate Indices according to Types of Growth of Coniferous Tree Species with the Decrease in Stand-Quality Level

Tree species	Types of growth			
	$T_d (Ct \leq 1.0)$		$T_{inc} (Ct \geq 1.0)$	
	Values of Indexes of rate in growth, $I_{gr}$			
	Index range	Average index	Index range	Average index
Austrian pine	1.8÷2.0	1.9	2.0÷2.3	2.15
Scots pine	2.3÷2.6	2.45	2.6÷3	2.8
Norway spruce	3.5÷4.4	3.95	4.4÷5.0	4.7
silver fir	4.0÷4.7	4.35	4.7÷5.3	5
Generally	1.8÷3.4	2.6	3.4÷5.3	4.35

The indices for silver fir and Norway spruce are of the broadest ranges and highest average values, next followed by those for Scots and Austrian pines. The growth curves' steepness decreases with the decrease in the shade tolerance of the tree species.

Generally, the range of the indices for  $T_d$  type, with a decreasing rate of the growth in height and an early climax of the increment, is from 1.8 to 3.4, and for  $T_y$  type, with an increasing growth rate, the respective range is from 3.4 to 5.3. The average values of the indices are 2.6 and 4.35, respectively.

As a comparison, the growth-rate indices for the two types of growth,  $T_d$  and  $T_{inc}$ , obtained for deciduous tree species (Petrin, 2022) are, respectively, 2.3 and 2.6, i.e. the curves of the growth of the deciduous tree species are, generally, less steep, especially those of the  $T_y$  type.

The following inferences can be made about the investigated model stands of Scots and Austrian pines, Norway spruce and silver fir on the basis of the results presented and analyses made.

## Inferences

- There is a narrow co-relationship between the zero natural indicators and the growth-type coefficients.
- The growth-type coefficients are obtained from the growth-rate indices by dividing them by the average index for a particular aggregate of stands, respective curves. And this is their advantage over the zero natural indicators, which require more complex calculations.
- The growth rate increases with the increase in the shade tolerance of the tree species within the range of a particular stand-quality class and also with the decrease in stand-quality level of a particular tree species.
- The ranges of growth-rate and their average values according to growth-types have been found with the Decrease in Stand-Quality Level for the investigated tree species - Scots and Austrian pines, Norway spruce and silver fir.

## Conclusion

The growth-type indices, as well as the growth-rate ones, are reliable and effective tools of investigation of the growth of forest stands and particular trees as in height so in every other forest-mensuration parameter.

## References

### Список литературы

1. Davidov, M. V. On the Matter of Finding by Measurements in the Field the Types of Growth of Tree Growing Stocks). *Forest Journal*. 1977: 6 (in Russian).
2. Davidov, M. V. Differentiated Establishment of the Quality Levels, Taking into Account the Peculiarities of their Growth in Height. *Forestry*, 1980:4.
3. Davidov, M. V. The results of the study of types of growth of forest stands of the main forest-forming species in Ukraine. *Forest Journal*, 1984: 5.
4. Diego Rodríguez de Prado, Jose Riofrío, Jorge Aldea, James McDermott, Felipe Bravo and Celia Herrero de Aza. Species Mixing Proportion and Aridity Influence in the Height–Diameter Relationship for Different Species Mixtures in Mediterranean Forests. *Forests* 2022, 13, 119. <https://doi.org/10.3390/f13010119>.
5. Douhovnikov Yu. Morphological classification – the basis for increasing the productivity of forests. Sofia. 1966: 25–40 (in Bulgarian).
6. Douhovnikov Yu., Iliev A. Tables of the rate of growth of Scots pine, Spruce and Fir according to types of forest stands. Collection. Increasing the productivity of coniferous forests. Zemizdat, Sofia. 1972 (in Bulgarian).
7. Douhovnikov Yu., Iliev A. Growth and productivity of various types of forest stands in our country. Collection. Increasing the productivity of coniferous forests. Sofia. 1972 (in Bulgarian).
8. Douhovnikov Yu., Bogdanov K. Dynamic stand-quality level and habitat conditions. *Sp. Forestry*. 1979: 12 (in Bulgarian).
9. Douhovnikov Yu. General dynamic classification according to stand-quality level. *Scientific works, VLTI*, vol. XXV. 1980 (in Bulgarian).
10. Facundo J. Oddi, Cecilia Casas, Matías G. Goldenberg, Juan P. Langlois, Jennifer B. Landesmann, Juan H. Gowda, Thomas Kitzberger, Lucas A. Garibaldi. Modeling potential site productivity for *Austrocedrus chilensis* trees in northern Patagonia (Argentina) // *Forest Ecology and Management*. 2022. Iss. 524. 120525. P. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120525>.
11. Jarosław Socha, Luiza Tyminska-Czabanska, Ewa Grabska, Stanisław Orzeł. Site index models for main forest-forming tree species in Poland. *Forests* 2020. V. 11. Article 301. <https://doi.org/10.3390/f11030301>.
12. Krustanov Kr., Raykov R. Handbook of dendrobiometry. Determination of the stand-quality level of tall beech stands (Gerhard). *Bulpofor*. 2004: 420 (in Bulgarian).
13. Kyle W. Tomlinson, Lourens Poorter, Frans Bongers, Fabian Borghetti, Loes Jacobs, Frank van Langevelde. Relative growth rate variation of evergreen and deciduous savanna tree species is driven by different traits. *Annals of Botany* 2014. V. 114, Iss. 2. P. 315–324. <https://doi.org/10.1093/aob/mcu107>.
14. Markov I., Mihov I. Professor Douhovnikov's Natural indicators. *Forest science*. 2007; 4: 59-86 (in Bulgarian). <https://naukazagorata.com/wp-content/uploads/2009/03/ivmarkovn.pdf>.
15. Mihov I. On the Dynamic Determination of the Quality Levels of Tree Growing Stocks. *Sat. International Anniversary Scientific Conference, Sopron*. 1983 (in Russian).
16. Mihov I. Indices for Identifying the Types of Growth of Growing Stocks. *The Forestry Journal*, 1984; 4: 49-52 (in Bulgarian).
17. Mihov I. A Method of Identifying the Types of Growth of Growing Stocks and Its Application into the Differentiated Establishment of the Quality Levels of Natural Stands of Scots Pine. *Dissertation*, 1986: 49-52 (in Bulgarian).
18. Mihov I., Petrin R. Indices for Identifying the Types of Growth of Natural Stands of Beech. In: *Second Balkan Conference on Studying, Protecting and Using Forest Resources, (3-5 June 1996, Sofia), Volume. I*. 1996: 50-53 (in Bulgarian).

19. Mihov, I. Forest Mensuration. RI939C Litera, Sofia. 2005: 120-121 (in Bulgarian). [https://knizhen-pazar.net/sold\\_products/books/777691-gorska-taksatsiya](https://knizhen-pazar.net/sold_products/books/777691-gorska-taksatsiya).
20. Nedyalkov, S. On the Growth and Productivity of Seed-Tree Beech in Our Country. In: Research Papers of the Forest Research Institute - Sofia. 1960; VIII: 131-146 (in Bulgarian).
21. Petrin, R. Regularities of the Growth of Beech Stands and Using These in Forest-Management Planning, 1988: 41-90 (in Bulgarian).
22. Petrin, R. Index method and its application in the study of the structure and growth of forest stands. Scientific researches of the Union of Scientists in Bulgaria-Plovdiv, series B. Natural Sciences and the Humanities, Vol. XXI; 2021, p. 113-125. ISSN 1311-9192 (Print), ISSN 2534-9376 (On-line). [https://usb-plovdiv.org/wp-content/uploads/2021/05/2021\\_estestveni\\_i\\_humanitarni\\_nauki\\_tom\\_XXI.pdf](https://usb-plovdiv.org/wp-content/uploads/2021/05/2021_estestveni_i_humanitarni_nauki_tom_XXI.pdf).
23. Petrin, R. Growth-rate Indices and Growthtype Coefficients in Height of Deciduous Forest stands. Forest Engineering journal, 2022, Vol. 12, No. 4 (48), pp. 47-59. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/4>.
24. Poryazov Ya., Tonchev T. and Dobrichov I. A Forest Surveyor's Handbook: Determination of the Stand-quality level of Natural Stands of Scots Pine, Tyurin A.S. p. 42. Determination of the stand-quality level of Seed-Tree Stands of Durmast oak, Hungarian oak, hairy oak and Turkey oak, Wiemenauer. 2004:214. (in Bulgarian) <https://knizhen-pazar.net/products/books/3010504-narachnik-na-taksatora>
25. Mario Trouillier, Marieke van der Maaten-Theunissen, Tobias Scharnweber, Martin Wilmking. A unifying concept for growth trends of trees and forests – the «Potential natural forest». Frontiers in Forests and Global Change. 2020. Vol. 3. Article 581334. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.581334>.
26. Yeongwan Seo, Daesung Lee, Jungkee Choi. Growth pattern analysis of major coniferous tree species in South Korea. Forest Science and Technology. 2017. Vol. 14 (1). P. 1–6. <https://doi.org/10.1080/21580103.2017.1409660>.

### Information about the author

✉ *Rumen D. Petrin* – Dr. Sci. (Forestry), Associated Professor, Forest Research Institute in Bulgarian Academy of Sciences, 132, St. Kliment Ohridski Blvd., Sofia, 1756, Bulgaria. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5831-5983>, e-mail: [lesni4eja2014@gmail.com](mailto:lesni4eja2014@gmail.com).

### Сведения об авторе

✉ *Румен Димитров Петрин* – кандидат (доктор\*) с.-х. наук (\*по болгарской номенклатуре: образовательная и научная степень «доктор»), доцент, научно-исследовательский институт леса Болгарской академии наук, бул. Климента Охридского, 132, г. София, 1756, Болгария. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5831-5983>, e-mail: [lesni4eja2014@gmail.com](mailto:lesni4eja2014@gmail.com).

✉ – Для контактов | Corresponding author


Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/2>


УДК 630\*641



## Пространственная дифференциация лесов субъектов Российской Федерации на основе авторской методики оценки уровня адаптации к изменениям климата

Екатерина И. Семёнова<sup>1</sup>✉, e.semenova@spb-niilh.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2176-845X>

Анастасия О. Сорока<sup>1</sup>, a.soroka@spb-niilh.ru  <https://orcid.org/0009-0003-0602-3449>

Иван С. Недбаев<sup>1,2</sup>, i.nedbaev@spb-niilh.ru  <https://orcid.org/0000-0003-0407-7585>

<sup>1</sup>ФБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства», Институтский проспект, 21, г. Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», Университетская набережная, 7–9, г. Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация

Изучение воздействия климатических изменений на леса является важной научно-практической задачей. С целью повышения эффективности управления лесным хозяйством авторами предложена методика оценки уровня адаптации лесов к изменениям климата. В статье приводится пространственная дифференциация уровня адаптации лесов, рассчитанного на 2021 год, и его анализ в разрезе федеральных округов и субъектов Российской Федерации. Для этого были исследованы данные государственной лесной статистики за период 2013–2022 гг., где отбирались показатели, отражающие адаптацию лесов к климатическим рискам. Была создана база данных, где для каждого субъекта Российской Федерации были отобраны и проанализированы индикативные показатели климатического риска. Сниженный или недостаточный уровень адаптации, свидетельствующие о необходимости увеличения объемов адаптационных мероприятий, характерны для 27 % субъектов РФ, а удовлетворительный, повышенный или высокий уровень адаптации, демонстрирующие уменьшение негативных проявлений климатических рисков, – для 73 % субъектов. В среднем по стране леса более адаптированы к рискам изменения продуктивности, увеличения вспышек насекомых-вредителей и увеличения экстремальных погодных явлений, чем к рискам роста числа лесных пожаров и изменения видового состава. Рекомендуется использовать методику оценки уровня адаптации лесов к климатическим изменениям при региональном планировании адаптационных мероприятий.

**Ключевые слова:** леса, изменение климата, меры адаптации, методика, климатические риски, лесные пожары, насекомые-вредители, экстремальные погодные явления

**Финансирование:** исследование выполнено в рамках государственного задания Федерального агентства лесного хозяйства от 29.12.2022 № 53-00011-23-00 по теме № 2 «Научно-аналитическое и организационно-методическое обеспечение реализации государственной климатической политики в области лесного хозяйства».

**Благодарности:** авторы выражают благодарность рецензентам и редакторам за вклад в экспертную оценку статьи.


**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Семенова, Е. И. Пространственная дифференциация лесов субъектов Российской Федерации на основе авторской методики оценки уровня адаптации к изменениям климата / Е. И. Семенова, А. О. Сорока, И. С. Недбаев // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 1 (53). – С. 16–34. – Библиогр.: с. 29–34 (35 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/2>.


Поступила 07.12.2023. Пересмотрена 22.01.2024. Принята 02.02.2024. Опубликована онлайн 20.03.2024.

## Article

### Spatial differentiation of forests in the Russian Federation based on the author's algorithm for assessing the level of adaptation to climate change

Ekaterina. I. Semyonova <sup>1</sup>✉, e.semenova@spb-niilh.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2176-845X>

Anastasia O. Soroka <sup>1</sup>, a.soroka@spb-niilh.ru  <https://orcid.org/0009-0003-0602-3449>

Ivan S. Nedbaev <sup>1,2</sup>, i.nedbaev@spb-niilh.ru  <https://orcid.org/0000-0003-0407-7585>

<sup>1</sup>*Saint-Petersburg Forestry Research Institute, Institutskiy prospekt, 21, Saint-Petersburg, 194021, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Saint-Petersburg State University, Universitetskaya naberezhnaya, 7–9, Saint-Petersburg, 199034, Russian Federation*

#### Abstract

Studying the impact of climate change on forests is an important scientific and practical task. In order to improve the efficiency of forest management, the authors propose a methodology for assessing the level of adaptation of forests to climate change. The article presents the spatial differentiation of the level of forest adaptation calculated for 2021 and its analysis in the context of federal districts and subjects of the Russian Federation. For this purpose, we studied the data of state forest statistics for the period 2013–2022, where we selected indicators reflecting the adaptation of forests to climate risks. A database was created where indicative indicators of climate risk were selected and analyzed for each constituent entity of the Russian Federation. Reduced or insufficient level of adaptation, indicating the need to increase the volume of adaptation measures, is characteristic of 27 % of the constituent entities of the Russian Federation, while a satisfactory, increased or high level of adaptation, demonstrating a reduction in the negative manifestations of climate risks, is characteristic of 73 % of the constituent entities. On average across the country, forests are more adapted to the risks of changes in productivity, increased outbreaks of insect pests and increased extreme weather events than to the risks of increased number of forest fires and changes in species composition. It is recommended to use the methodology for assessing the level of adaptation of forests to climate change at the level of regional planning of adaptation measures.

**Keywords:** *forests, climate change, adaptation measures, methodology, climate risks, forest fires, insect pests, extreme weather events*

**Funding:** The reported study was funded by Federal forestry agency, state assignment No. 53-00011-23-00 dated 29.12.2022 on topic No. 2 "Scientific-analytical, organizational and methodological support for the implementation of the state climate policy in forestry".

**Acknowledgments:** authors thank their gratitude to the reviewers and editors for their contribution to the expert evaluation of the article.

**Conflict of interest:** authors stated that there was no conflict of interest.

**For citation:** Semyonova E. I., Soroka A. O., Nedbaev I. S. (2024). Spatial differentiation of forests of the Russian Federation subjects based on author's algorithm for assessing the level of adaptation to climate change. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 1 (53), pp. 16-34 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/2>.

*Received* 07.12.2023. *Revised* 22.01.2024. *Accepted* 02.02.2024. *Published online* 20.03.2024.

## Введение

В течение последних десятилетий климатические изменения стали одной из наиболее серьезных проблем, с которыми приходится справляться мировому сообществу [1]. Леса России выполняют колоссальную климаторегулирующую функцию, являясь одним из крупнейших мировых депо углерода [2, 3]. Между тем, лесные экосистемы подвержены воздействию меняющихся факторов окружающей среды, что обуславливает необходимость изучения взаимодействия леса и климата [4, 5]. Одним из ключевых аспектов адаптации лесов является приспособление лесов к меняющимся условиям окружающей среды [6, 7, 8]. Одним из инструментов адаптации выступают мероприятия<sup>1</sup>, направленные на снижение климатических рисков [9].

Мероприятия по адаптации лесного хозяйства к климатическим изменениям направлены на уменьшение следующих рисков: изменение продуктивности лесов [10, 11, 12], изменения в видовом составе лесов [13, 14, 15], увеличение частоты возникновения лесных пожаров и площадей, пройденных огнем [16, 17, 18], увеличение частоты вспышек массового размножения вредных организмов [19, 20] и увеличение частоты проявления последствий экстремальных погодных явлений в лесах [20, 21, 22]. В Лесных планах субъектов Российской Федерации, утвержденных после 2017 года, в главе 4.2 содержится информация<sup>2</sup> о планируемых мероприятиях по сохранению экологического потенциала лесов, адаптации к изменениям климата и повышению устойчивости лесов. Более подробная информация, представленная в табличной форме, с указанием ежегодных плановых показателей адаптационных мероприятий представлена в Приложении 21 к Лесному плану субъекта. В настоящей статье предлагается методика оценки эффективности и результативности выполненных адаптационных мероприятий.

Однако на вопрос, насколько эффективны выполненные мероприятия по адаптации лесов, точнее можно будет ответить по прошествии не менее 30 лет.

Ранее проводились исследования по оценке уязвимости и рассматривался методический подход к оценке адаптационного потенциала лесов субъектов РФ к изменению климата [23, 24], в данной статье авторы предлагают методику оценки эффективности на основе данных о динамике индикативных показателей.

Целью настоящего исследования является разработка методики оценки результативности мер по адаптации к изменениям климата в сфере лесного хозяйства на региональном уровне на основании данных государственной лесной статистики.

В задачи исследования входит определение индикативных показателей и критериев оценки для каждого климатического риска, проведение расчетов уровня адаптации согласно разработанной методике, анализ адаптации лесов к изменениям климата в разрезе субъектов Российской Федерации.

## Материалы и методы

### *Объект и предмет исследования*

Объектом исследования являются леса субъектов Российской Федерации, а предметом – уровень адаптации лесов к негативному проявлению рисков, вызванных климатическими изменениями.

### *Сбор данных*

В части оценки эффективности и результативности мер по адаптации к изменениям климата в сфере лесного хозяйства на региональном уровне предлагается использование метода сравнительного анализа ретроспективной динамики индикативных показателей состояния лесов с оцениваемым годом.

Уровень адаптации лесов субъекта Российской Федерации к риску, вызванному климатическими изменениями (индикативный показатель), –

<sup>1</sup> Report of the Conference of the Parties on its twenty-seventh session, held in Sharm el-Sheikh from 6 to 20 November 2022. – Distr.: General 17 March 2023 // United Nations Climate Change : Official website. – URL: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cp2022\\_10a01\\_adv.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cp2022_10a01_adv.pdf) (дата обращения: 20.06.2023).

<sup>2</sup> Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 20.12.2017 № 692 «Об утверждении типовой формы и состава лесного плана субъекта Российской Федерации, порядка его подготовки и внесения в него изменений» // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/542616941> (дата обращения: 22.08.2023).

## Природопользование

показатель, характеризующий снижение негативных проявлений риска после проведения комплекса адаптационных мероприятий в сравнении с многолетними значениями негативного проявления риска. Иными словами, данный показатель демонстрирует,

отразилось ли выполнение адаптационных мероприятий на фактическом проявлении климатического риска.

Негативные проявления рисков, вызванных климатическими изменениями, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Индикативные показатели проявления климатических рисков

Table 1

Indicative indicators of the manifestation of climate risks

Риск, вызванный климатическими изменениями   Risk caused by climate change	Индикативные показатели   Indicative indicators
Изменение продуктивности лесов в связи с изменениями средних значений температуры и количества выпадаемых осадков   Changes in forest productivity due to changes in average temperature and precipitation values	Снижение среднего прироста на гектар   Decrease in average growth per hectare
Изменения в видовом (породном) составе лесов   Changes in the species composition of forests	Уменьшение площади, покрытой твердолиственными и хвойными породам, при одновременном увеличении площади мягколиственных пород   Reduction of the area occupied by hardwoods and coniferous species with simultaneous increase of the area occupied by small-leaved species
Увеличение частоты возникновения (лесных) пожаров в лесах и площадей, пройденных пожарами   Increase in the frequency of fires in forests and the areas covered by fires	Увеличение числа пожаров Увеличение площади, пройденной огнем   Increase in the number of fires Increase in the area covered by fire
Увеличение частоты вспышек массового размножения вредных организмов в лесах   Increased frequency of pest outbreaks in forests	Увеличение площади очагов вредных организмов   Increase in the area of pest outbreaks
Увеличение частоты проявления последствий экстремальных погодных явлений в лесах   Increased frequency of occurrence of consequences of extreme weather events in forests	Увеличение площади погибших лесных насаждений от погодных и почвенно-климатических условий   Increase in the area of dead forest plantations from weather and soil-climatic conditions

Источник: собственные вычисления авторов [32]

Source: author's calculations [32]

Для расчёта индикативных показателей проявления климатических рисков используются статистические данные из Государственного лесного реестра (формы ГЛР) и отчетов органов исполнительной власти (формы ОИП)<sup>3</sup>. Для определения уровня

адаптации в оцениваемый год необходимо рассчитать текущее изменение индикативного показателя климатического риска.

Ниже представлен алгоритм оценки уровня адаптации лесов к следующим климатическим рискам: изменение продуктивности, рост числа пожаров, вспышек вредных организмов и увеличение

<sup>3</sup> Шаблоны форм отчетности // Рослесинфорг : Официальный сайт. – URL: [https://roslesinfor.ru/templates\\_reporting/](https://roslesinfor.ru/templates_reporting/) (дата обращения: 25.09.2023).

числа экстремальных погодных явлений. Изменение индикативного показателя климатического риска определяется по следующей формуле:

$$\text{ИП} = \frac{Д1}{Д2} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где ИП – изменение индикативного показателя климатического риска, %,

Д1 – динамика индикативного показателя климатического риска за год, следующий за оцениваемым, в сравнении с базовым периодом,

Д2 – тенденция многолетнего изменения индикативного показателя климатического риска.

Если  $Д1 < 0$  и  $Д2 < 0$ , то тогда формула предстает в виде

$$\text{ИП} = \frac{Д1}{Д2} \cdot (-100 \%). \quad (2)$$

При расчёте изменения среднего прироста на гектар значение изменения индикативного показателя климатического риска (ИП) необходимо умножить на коэффициент  $-1$ . Данное обстоятельство учитывает то, что увеличение среднего прироста является благоприятным фактором для адаптации лесов.

Динамика индикативного показателя климатического риска за год рассчитывается по формуле

$$Д1 = y_{i+1} - \frac{\sum_{i-n}^{i-1} y}{n}, \quad (3)$$

где  $y$  – значение показателя индикативного показателя климатического риска, ед.,

$i$  – год выполнения адаптационных мероприятий, подвергающихся оценке эффективности,

$n$  – кол-во лет базового периода, взятого для оценки индикативного показателя климатического риска (лет).

Динамика индикативного показателя климатического риска за два равнозначных многолетних периода рассчитывается по формуле

$$Д2 = \frac{\sum_{m+1}^{i+1} y}{\frac{n+2}{2}} - \frac{\sum_{i-n}^m y}{\frac{n+2}{2}}, \quad (4)$$

где  $m$  – год, разделяющий два равнозначных многолетних периода, составляющих базовый период,

$i$  – год выполнения адаптационных мероприятий, подвергающихся оценке эффективности,

$n$  – кол-во лет базового периода, взятого для оценки индикативного показателя климатического риска (лет). Рекомендуется использовать  $n > 5$ .

Индикативным показателем риска изменения в видовом составе выступает уменьшение площади, покрытой твердолиственными и хвойными породами, при одновременном увеличении площади мягколиственных пород, так как хвойные и твердолиственные породы являются более востребованными на рынке.

Эффективность выполнения адаптационных мероприятий рассчитывается отдельно по каждому риску, вызванному климатическими изменениями, то есть леса субъекта РФ могут иметь высокий уровень адаптации к одному риску и недостаточный – к другому.

Для определения уровня адаптации в оцениваемый год необходимо рассчитать текущее изменение индикативного показателя климатического риска.

Таким образом, в оценке эффективности адаптационных мероприятий учитываются как климатические тенденции, характерные для каждого субъекта РФ, так и последствия реализации тех или иных мер.

Оценка эффективности и результативности мер по адаптации к изменениям климата проводится на основании произведенных расчетов изменения индикативного показателя климатического риска в соответствии с критериями согласно табл. 2.

### *Анализ данных*

Выборками в настоящем исследовании являются данные о состоянии лесного фонда в разрезе субъектов Российской Федерации (средний прирост; площадь, покрытая разными группами пород; площадь, пройденная огнем; число лесных пожаров; площадь очагов вредных организмов; площадь погибших лесных насаждений от погодных и почвенно-климатических условий), а также расчетные авторские показатели, описанные выше. Для анализа выборок на нормальность использовался критерий Колмогорова-Смирнова. Так как подавляющее большинство выборок имели ненормальное распределение, для их сравнения использовался непараметрический U-критерий Манна-Уитни (уровень значимости составлял 0,05). Расчет статистических критериев производился в программном обеспечении SPSS Statistics. Корреляционный анализ проводился в Microsoft



## Природопользование

Excel с помощью дополнительного пакета «Анализ данных».

Таблица 2

Критерии оценки уровня адаптации лесов к изменению климата

Table 2

Criteria for assessing the level of forest adaptation to climate change

Уровень адаптации лесов субъекта Российской Федерации   Level of adaptation of forests of the subject of the Russian Federation	Характеристика уровня адаптации   Characterization of adaptation level	Критерии уровня адаптации   Adaptation level criteria
Высокий уровень адаптации   High adaptation level	Мероприятия по адаптации являются высокоэффективными   Adaptation measures are highly effective	Значительное снижение количественных значений индикативных показателей проявления климатических рисков (ИП $\leq -100\%$ )   Significant decrease in quantitative values of indicative indicators of climate risks manifestation (Indicative Indicator $\leq -100\%$ )
Повышенный уровень адаптации   Increased adaptation level	Мероприятия по адаптации приводят к положительным изменениям   Adaptation activities lead to positive change	Снижение количественных значений индикативных показателей проявления климатических рисков ( $-100\% < \text{ИП} < 0\%$ )   Decrease in quantitative values of indicative indicators of climate risks manifestation ( $-100\% < \text{Indicative Indicator} < 0\%$ )
Удовлетворительный уровень адаптации   Satisfactory adaptation level	Существенных изменений не наблюдается   No significant changes observed	Не наблюдается изменения количественных значений индикативных показателей проявления климатических рисков (ИП=0)   No change in quantitative values of indicative indicators of climate risks manifestation is observed (Indicative Indicator = 0)
Сниженный уровень адаптации   Reduced adaptation levels	Рекомендуется обратить внимание на повышение эффективности адаптационных мероприятий   Recommended to pay attention to improving the effectiveness of adaptation measures	Увеличение количественных значений индикативных показателей проявления климатических рисков ( $0\% < \text{ИП} < 100\%$ )   Increase in quantitative values of indicative indicators of manifestation of climate risks ( $0\% < \text{Indicative Indicator} < 100\%$ )
Недостаточный уровень адаптации   Insufficient adaptation level	Рекомендуется обратить пристальное внимание на повышение эффективности адаптационных мероприятий в связи с ростом негативных проявлений климатических рисков   Recommended to pay close attention to improving the effectiveness of adaptation measures due to the increasing negative manifestations of climate risks	Значительное увеличение количественных значений индикативных показателей проявления климатических рисков (ИП $\geq 100\%$ )   Significant increase in quantitative values of indicative indicators of climate risks manifestation (Indicative Indicator $\geq 100\%$ )

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: author's calculations

## Результаты и обсуждение

Согласно проведенным расчетам индикативных показателей по методике, описанной выше, уровень адаптации лесов Российской Федерации к изменениям климата показывает значительную региональную дифференциацию. Это вызвано как неоднородностью выполнения адаптационных мероприятий, так и подверженностью субъекта тем или иным негативным факторам окружающей среды, поскольку известно о взаимосвязи между абиотическими факторами среды и адаптационным потенциалом лесных экосистем [7].

Одним из климатических рисков, который потенциально может оказывать положительный эффект для лесного хозяйства при потеплении, является смена продуктивности насаждений. Это характерно для территорий, где лимитирующим фактором является недостаток эффективных температур [23, 25]. При этом в лесах южных регионов лесостепной зоны с потеплением климата будут возрастать риски появления засух, что будет негативно отражаться на приросте и требовать дополнительных мер по адаптации [11].

Текущая оценка адаптации лесов показала, что средние значения индикативного показателя для риска уменьшения продуктивности находятся ниже 0 для всех федеральных округов, кроме Сибирского федерального округа. То есть наиболее негативная динамика, связанная с уменьшением продуктивности лесов, характерна для лесов Сибири. Это связано с уменьшением среднего прироста

на гектар в регионах юго-запада Сибири за последние 10 лет (рис. 1), что может быть обусловлено засушливыми периодами и последствиями лесных пожаров [26].

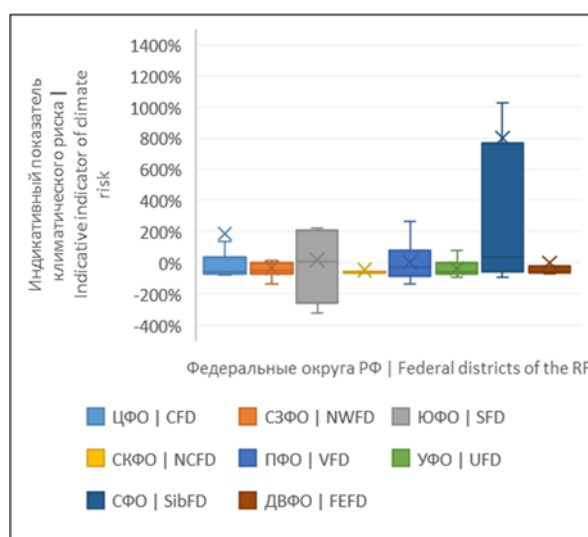


Рисунок 1. Индикативный показатель риска изменения продуктивности лесов  
Figure 1. Indicative indicator of vulnerability to the risk of changes in the productivity of the forests

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

По данным, полученным авторами в процессе исследования, высокий уровень адаптации к риску изменения продуктивности характерен для субъектов Приволжского федерального округа (Самарская и Саратовская области и Республика Чувашия), для них свойственно наибольшее увеличение продуктивности лесов за исследуемый период (рис. 2).

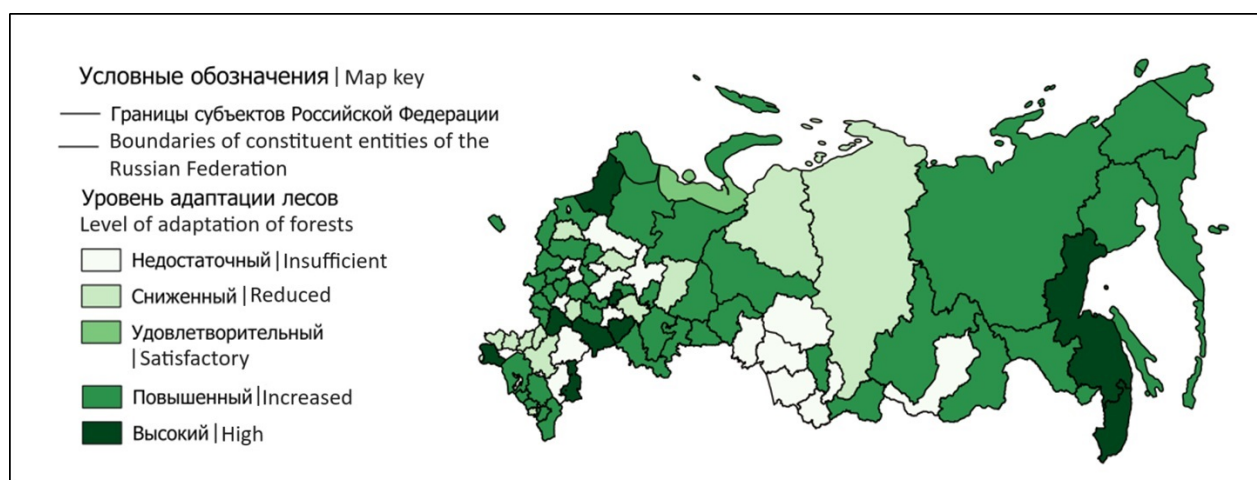


Рисунок 2. Схема пространственной дифференциации субъектов Российской Федерации по уровню адаптации к риску изменения продуктивности лесов

Figure 2. Scheme of spatial differentiation of the constituent entities of the Russian Federation according to the level of adaptation to the risk of changes in forest productivity

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

К риску изменения породного состава наиболее адаптированы субъекты Северо-Западного федерального округа, так как во всех субъектах без исключения наблюдается увеличение площадей, покрытых всеми группами пород (хвойными, твердолиственными и мягколиственными) в 2022 году по отношению к динамике за последние 10 лет. Согласно проведенным расчетам, высокий уровень адаптации к данному риску отмечен в некоторых субъектах Урала и Западной Сибири, Забайкалье, Липецкой, Ярославской, Оренбургской областях, Республиках Крым и Северная Осетия. Возможной причиной дальнейшего изменения видового состава будет прогнозируемое повышение температуры на 1 °C к 2050 году. Отмечают, что трансформация растительных сообществ в большей степени затронет хвойные леса [27]. Результаты настоящего исследования показывают, что субъекты европейской части России, имеющие хвойные леса в качестве преобладающей группы пород, в основном, адаптированы к

климатическим изменениям, то есть, в них на 2022 год площадь хвойных пород выше, чем в среднем за предшествующие 10 лет. В Центральном федеральном округе отмечают отсутствие неморализации видов ельников и сосняков в связи с современными изменениями климата [28]. Регионы Российской Федерации, где наблюдается смена твердолиственных пород на мелколиственные, нуждаются в дополнительных адаптационных мероприятиях. В особенности негативные тенденции отмечены для территории юга европейской части России, регионов Дальнего Востока и Центральной Сибири (рис. 3). В Средней Сибири наиболее уязвимыми к климатическим изменениям называют мерзлотные ландшафты с темной хвойной тайгой [29].

Изменение средней площади хвойных, твердолиственных и мелколиственных пород при сравнении двух пятилетних периодов (2013–2017 и 2018–2022 гг.) по федеральным округам представлено в табл. 3.

Изменение видового состава лесов

Table 3

Changes in forest species composition

Федеральный округ РФ   Federal District of the Russian Federation	Динамика площади групп пород, га   Dynamics of area of species groups, ha		
	Хвойные   Conifers	Твердолиственные   Hardwoods	Мелколиственные   Small-leaved
ЦФО   CENTRAL FEDERAL DISTRICT	-161	4	258
СЗФО   NORTH-WEST FEDERAL DISTRICT	12105	8	4724
ЮФО   SOUTHERN FEDERAL DISTRICT	2	23	1
СКФО   NORTH CAUCASUS FEDERAL DISTRICT	-3	-1	-4
ПФО   VOLGA FEDERAL DISTRICT	-341	-45	1108
УФО   URAL FEDERAL DISTRICT	-277	0	179
СФО   SIBERIAN FEDERAL DISTRICT	-647	0	65
ДВФО   FAR EASTERN FEDERAL DISTRICT	-2914	-494	-97

Источник: собственные вычисления авторов

Source: author's calculations

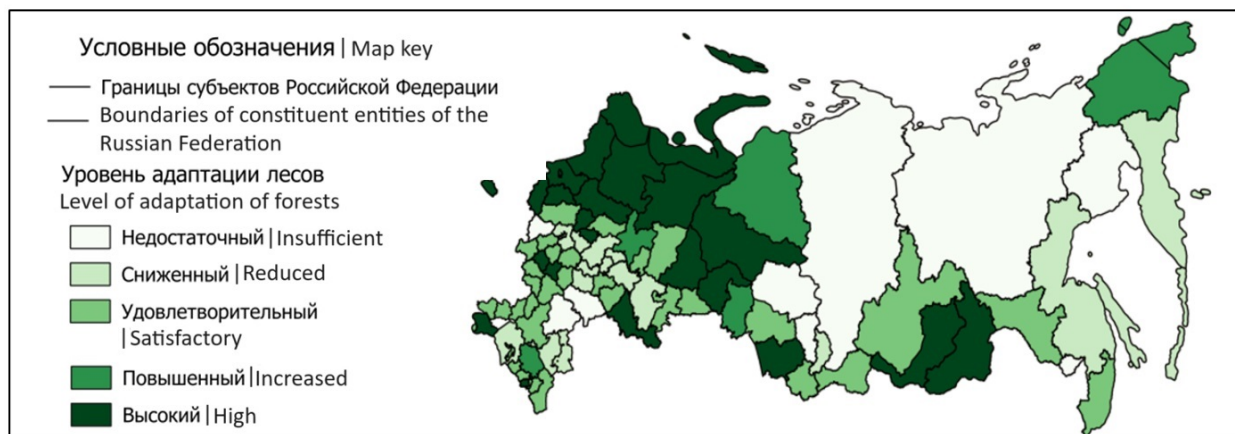


Рисунок 3. Схема пространственной дифференциации субъектов Российской Федерации по уровню адаптации к риску изменения видового состава лесов

Figure 3. Scheme of spatial differentiation of the constituent entities of the Russian Federation according to the level of adaptation to the risk of changes in the species composition of forests

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Согласно полученным результатам, индикативный показатель для риска пожаров более 0 (сниженный и недостаточный уровень адаптации лесов) типичен для Южного, Уральского и Сибирского федеральных округов (рис. 4). В них в 2022 году площадь и число пожаров превышали многолетние значения. В частности, для территории Средней Сибири количество и площадь лесных пожаров возрастает последние два десятилетия [30].

Результаты расчета уровня адаптации показали, что к риску увеличения частоты возникновения и площади лесных пожаров наиболее адаптирован Северо-Западный федеральный округ – практически во всех субъектах (за исключением Республики Коми и Ненецкого автономного округа) наблюдается снижение площади и числа пожаров за рассматриваемый период (рис. 5). В нем же наблюдается и самая большая неоднородность по уровню адаптации. Наиболее благоприятная динамика, которая свидетельствует о высоком уровне адаптации, характерна для Ленинградской области (в 2022 году было всего 77 пожаров при среднем значении за многолетний период около 300 пожаров в год). Неблагоприятная динамика наблюдается в Республике Коми, в которой при многолетних значениях ежегодной площади, пройденной огнем, в 6 тыс. га на 2022 год данный показатель составил 59 тыс. га, что почти на порядок больше. Пик пожаров в 2022 году объясняют жарким летом с незначительным количеством осадков [31].

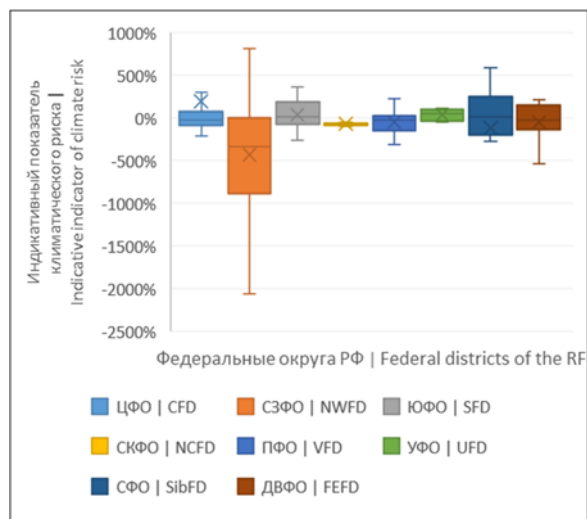


Рисунок 4. Индикативный показатель риска увеличения числа пожаров

Figure 4. An indicative indicator of vulnerability to the risk of an increase in the number of fires

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

Адаптация к риску увеличения лесных пожаров происходит очень дифференцированно, имеются значительные региональные различия (субъекты, как правило, имеют либо недостаточный уровень адаптации, либо высокий). В 36 % случаев встречается повышенный уровень адаптации к рискам, сниженный уровень адаптации – только в 9 % случаев. К регионам с недостаточным уровнем адаптации к риску лесных пожаров можно отнести Московскую и Новосибирскую области, Республику Адыгею и ряд других [32].

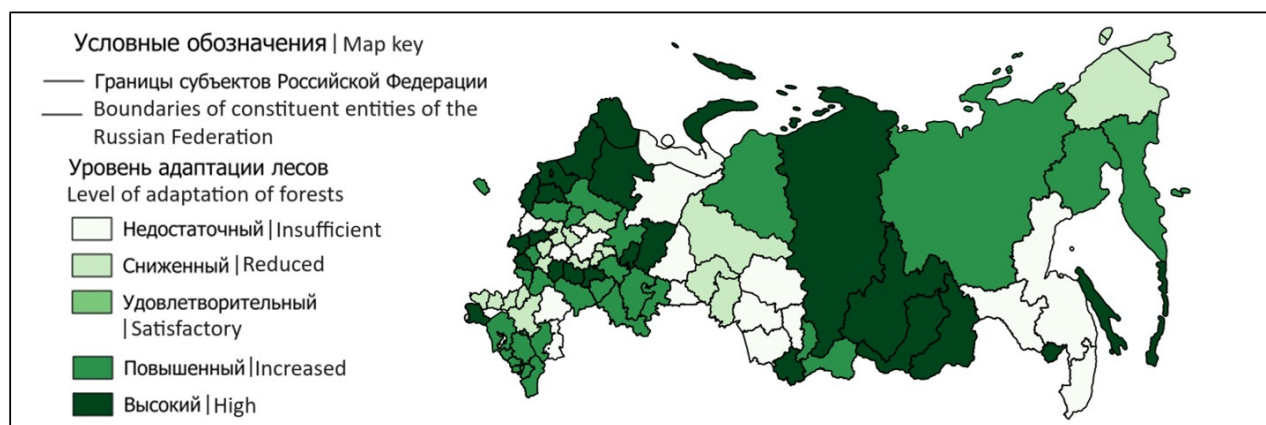


Рисунок 5. Схема пространственной дифференциации субъектов Российской Федерации по уровню адаптации к риску увеличения частоты и площади лесных пожаров

Figure 5. Scheme of spatial differentiation of the constituent entities of the Russian Federation by level of adaptation to the risk of increasing frequency and area of increasing frequency forest fires

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Несмотря на негативную динамику к другим рискам для Сибирского федерального округа, для риска увеличения насекомых-вредителей уровень адаптации повышенный и высокий (рис. 6). Однако наблюдается неравномерность адаптации внутри самого округа. Например, в Республике Тыва ежегодная площадь очагов вредных организмов составляет, согласно многолетним данным, порядка 3000 га, но в 2022 году площадь очагов составила 102 тыс. га, что явно свидетельствует о недостаточности мер по адаптации к данному риску. Более того, в лесостепной зоне Республики Тыва поражение вредителями вызывает депрессию прироста [33], то есть одни риски, вызванные климатическими изменениями, усиливают негативное проявление других рисков. В Республике Алтай средняя ежегодная площадь очагов вредных организмов составляет 200 тыс. га, и вредителей выделяют как один из факторов, приносящих наибольший ущерб лесам Алтае-Саянского лесорастительного района [34]. Но в 2022 году, после проведения ряда адаптационных мероприятий, площадь очагов снизилась до 50 тыс. га. Повышенный или высокий уровень адаптации к риску увеличения вспышек насекомых-вредителей, согласно расчетам авторов настоящей статьи, характерен для лесов Центрального, Северо-

Западного, Приволжского и большей части Сибирского федеральных округов. Опыт данных регионов можно взять за основу планирования превентивных мер адаптации лесов [35].

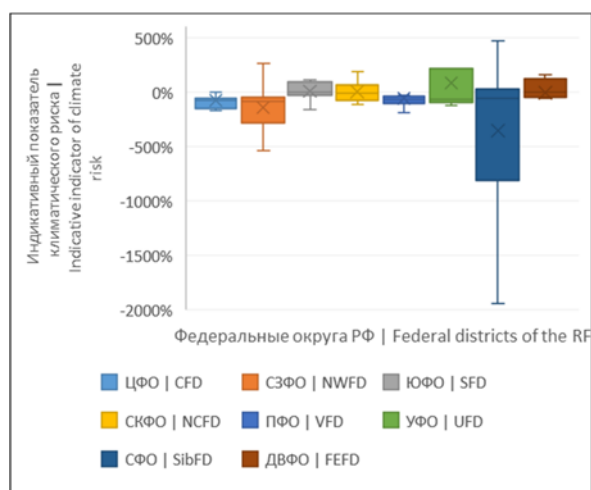


Рисунок 6. Индикативный показатель риска увеличения вспышек вредных организмов

Figure 6. Indicative indicator of vulnerability to the risk of increased outbreaks of harmful organisms

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Согласно проведенному расчету, к риску увеличения вспышек насекомых-вредителей наиболее



адаптированы субъекты Центрального федерального округа. Наблюдается тенденция к снижению площадей очагов вредных организмов в Брянской,

Калужской, Московской, Орловской, Смоленской, Тамбовской и Тверской областях (рис. 7).

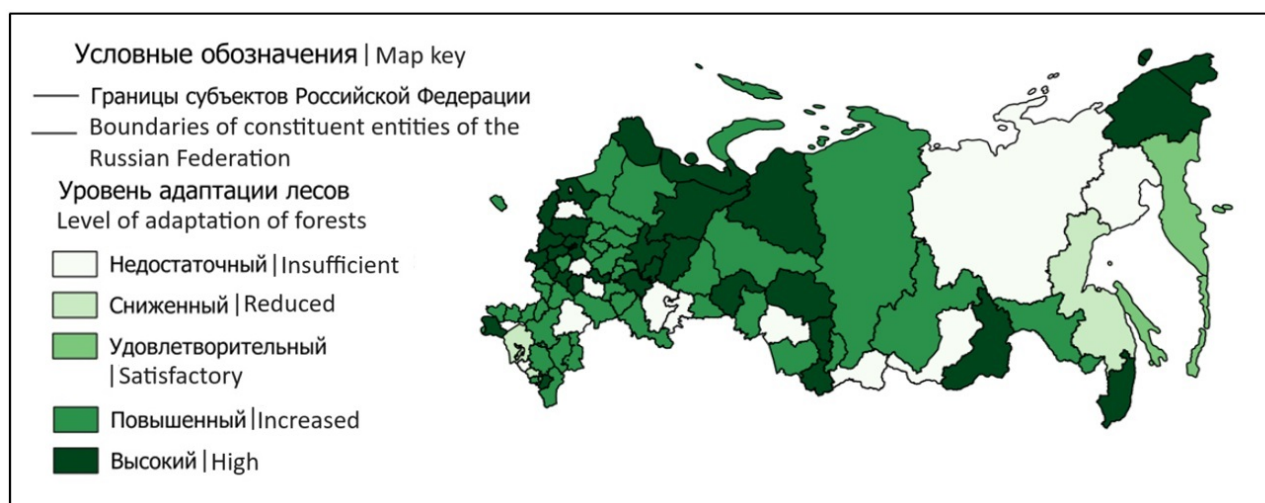


Рисунок 7. Схема пространственной дифференциации субъектов Российской Федерации по уровню адаптации к риску увеличения вспышек насекомых и болезней леса

Figure 7. Scheme of spatial differentiation of the subjects of the Russian Federation in terms of adaptation to the risk of increased outbreaks of insects and forest diseases

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Адаптация лесов к увеличению экстремальных погодных явлений выглядит достаточно успешно, так как в 81 субъекте Российской Федерации индикативный показатель к данному риску был ниже 0 (рис. 8). Наиболее высокий разброс уровня адаптации зафиксирован в Центральном федеральном округе. Лучше всего ситуация обстоит во Владимирской области, где среднее значение площади погибших лесных насаждений по почвенно-климатическим причинам за 2013-2021 гг. составляет 195 га, а в 2022 году – около 60 га, что является благоприятной ситуацией. Негативные тенденции сильнее всего проявляются в Калужской области, где за последние пять лет гибель лесов от неблагоприятных факторов в среднем выросла в 2 раза. Негативная динамика сохраняется в ряде регионов, преимущественно юга и центра европейской части России (рис. 9). Рассчитанный уровень адаптации для 2021 года в соответствии с методикой согласуется с ранее описанной в литературе способностью к адаптации для лесов (для временного интервала 2000-2017 гг.) [19]. В ряде регионов наблюдаются улучшения – так, в Тамбовской области способность к адаптации

лесов за период наблюдений 2000-2017 гг оценивается как низкая (0,013), тогда как по нашим расчетам в 2018-2022 гг. гибель от экстремальных погодных явлений по сравнению с предыдущим пятилетним периодом снизилась почти в 5 раз, что позволяет делать вывод о положительной динамике в адаптации лесов.

Дальневосточный федеральный округ наиболее адаптирован к риску увеличения экстремальных погодных явлений. За последнее десятилетие на этой территории снизилась площадь погибших насаждений от погодных и почвенно-климатических условий. Наиболее существенно гибель от экстремальных погодных явлений за последние пять лет снизилась в Сахалинской области (2026 га), Забайкальском (1086 га) и Приморском крае (843 га). Уровень адаптации на 2021 год наиболее высок в Амурской и Магаданской областях, Хабаровском и Камчатском крае.

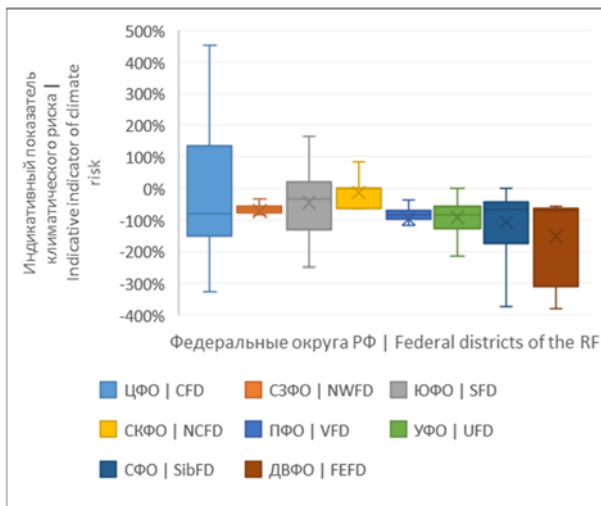


Рисунок 8. Индикативный показатель риска увеличения экстремальных погодных явлений  
 Figure 8. Indicative indicator of vulnerability to the risk of an increase in extreme weather events  
 Источник: собственная композиция авторов  
 Source: author's composition

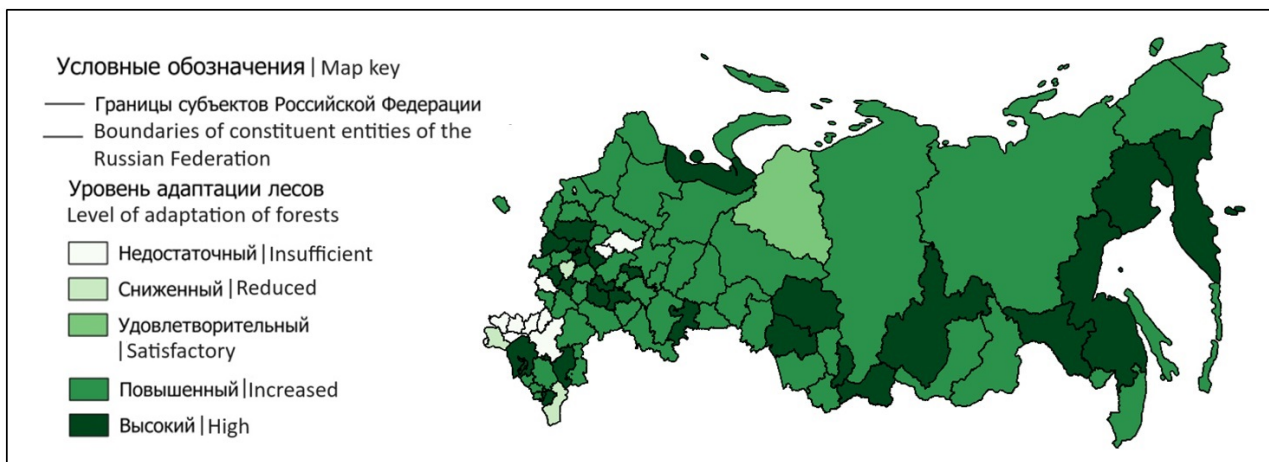


Рисунок 9. Схема пространственной дифференциации субъектов Российской Федерации по уровню адаптации к риску увеличения частоты экстремальных погодных явлений  
 Figure 9. The scheme of spatial differentiation of the subjects of the Russian Federation by the level of adaptation to the risk of an increase in the frequency of extreme weather events

Источник: собственная композиция авторов  
 Source: author's composition

### Заключение

Разработанная методика оценки уровня адаптации лесов к климатическим изменениям, представленная в настоящей статье, основана на анализе статистических данных о лесах и позволяет делать выводы о текущей ситуации и необходимости проведения адаптационных мероприятий в регионе.

Сниженный или недостаточный уровень адаптации, при изучении всех рисков, имеют 27 % субъектов РФ, а удовлетворительный, повышенный или высокий уровень адаптации – 73 % субъектов. Так как уровень адаптации рассчитывался на основании данных за последние 10 лет, можно сказать, что в большинстве субъектов наблюдается тенденция на уменьшение негативных проявлений рисков,

вызванных климатическими изменениями. Леса Российской Федерации лучше адаптированы к рискам изменения продуктивности, увеличения вспышек насекомых-вредителей и увеличения экстремальных погодных явлений в лесах, чем к риску изменения видового состава и роста лесных пожаров. Возникают сложности в адаптации к риску смены породного состава, что, вероятно, связано с отдаленным эффектом адаптационных мероприятий. Адаптация к риску увеличения лесных пожаров происходит дифференцированно, имеются значительные региональные различия (субъекты, как правило, имеют либо недостаточный уровень адаптации,



либо высокий). В 36 % случаев встречается повышенный уровень адаптации к рискам, сниженный уровень адаптации – только в 9 % случаев.

Рекомендуется использовать предложенную в настоящей статье методику оценки уровня адаптации лесов к климатическим изменениям на уровне

регионального планирования при оценке эффективности реализации адаптационных мероприятий.

### Список литературы

1. Лукина Н. В. Глобальные вызовы и лесные экосистемы / Н. В. Лукина // Вестник Российской академии наук. – 2020. – Т. 90, № 6. – С. 528–532. – DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869587320060080>.
2. Оценка вклада российских лесов в снижение рисков климатических изменений / Е. А. Ваганов, Б. Н. Порфирьев, А.А. Широв [и др.] // Экономика региона. – 2021. – Т. 17, № 4. – С. 1096–1109. – DOI 10.17059/ekon.reg.2021-4-4. – DOI: <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2021-4-4>.
3. Болдвин-Кантелло, В. Леса как центр действий по предотвращению глобального изменения климата / В. Болдвин-Кантелло // Устойчивое лесопользование. – 2020. – № 3(62). – С. 25–26. – URL: <https://www.elibrary.ru/qvppfx>.
4. Лоскин, М. И. Процессы, связанные с изменением климата, влияющие на устойчивость геосистем (на примере Центральной Якутии) / М. И. Лоскин, С. П. Готовцев, С. А. Павлова // Природообустройство. – 2021. – № 1. – С. 22–28. – DOI <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2021-1-22-28>.
5. Heidari, H. Effects of Climate Change on Natural-Caused Fire Activity in Western U.S. National Forests / Heidari H., Arabi M., Warziniack T. // Atmosphere. – 2021. – № 12 (981). – P. 1–16. – DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos12080981>.
6. Sensitivity analysis of hydrological processes to perturbed climate in a southern boreal forest basin / Z. He, J. W. Pomeroy, X. Fang, A. Peterson // Journal of Hydrology. – 2021. – Vol. 601. – P. 126706. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126706>.
7. Константинов, А. В. Сценарный подход к адаптации лесных экосистем Российской Федерации в условиях изменений климата / А. В. Константинов // Известия РАН. Серия географическая. – 2023. – № 4. – С. 558–567. – DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587556623040039>.
8. Оценка влияния ожидаемых изменений климата на лесное хозяйство / И. О. Торжков, Е. А. Кушнир, А. В. Константинов, Т. С. Королева, С. В. Ефимов, С. М. Школьник // Метеорология и гидрология. – 2019. – № 3. – С. 40–50. – URL: <https://www.elibrary.ru/vwilxo>.
9. Липка, О. Н. Роль лесов в адаптации природных систем к изменениям климата / О. Н. Липка, М. Д. Корзухин, М. Г. Замолдчиков [и др.] // Лесоведение. – 2021. – № 5. – С. 531–546. – DOI: <https://doi.org/10.31857/S0024114821050077>.
10. Влияние изменений климата на лесные ресурсы Республики Башкортостан / Р. Р. Байтурина, А. К. Габделхаков, О. В. Халикова [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2020. – Т. 10, № 4 (40). – С. 99–109. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.4/8>. – EDN YWUUIJW.
11. Forest structure drives the expected growth of *Pinus nigra* along its latitudinal gradient under warming climate / D. Candel-Pérez, M. E. Lucas-Borja, A. I. García-Cervigón [et al.] // Forest Ecology and Management. – 2022. – Vol. 505. – P. 119818. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119818>.
12. Kai, Xu. Assessing the vulnerability of ecosystems to climate change based on climate exposure, vegetation stability and productivity / Kai Xu, Xiangping Wang, Chao Jiang & Osbert Jianxin Sun // Forest Ecosystems. – 2020. – Vol. 7, Article number: 23. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40663-020-00239-y>.
13. Problem of climate-driven dynamics in the genetic forest typology / V. Fomin, N. Ivanova, A. Mikhailovich, E. Zolotova // AIP Conference Proceedings : 4th International Conference on Modern Synthetic Methodologies for

Creating Drugs and Functional Materials, MOSM 2020, Yekaterinburg, Vol. 2388, Issue 1. – American Institute of Physics Inc. : American Institute of Physics Inc., 2021. – P. 030007. – DOI <https://doi.org/10.1063/5.0068806>.

14. Hinze, J. Climate-Adapted Potential Vegetation – A European Multiclass Model Estimating the Future Potential of Natural Vegetation / J. Hinze, A. Albrecht, H.-G. Michiels // *Forests*. – 2023. – № 14. – P. 1–19. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14020239>.

15. Кузнецова, Н. Ф. Состояние лесов и динамика их породного состава в Центральном федеральном округе / Н. Ф. Кузнецова, М. Ю. Сауткина // *Лесохозяйственная информация*. – 2019. – № 2. – С. 25–45. – DOI <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.2.03>.

16. Climate variability may delay post-fire recovery of boreal forest in Southern Siberia, Russia / Q. Sun, R. Baxter, A. Burrell [et al.] // *Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 13, No. 12. – DOI <https://doi.org/10.3390/rs13122247>.

17. Проблемы и перспективы охраны лесов от пожаров / М. А. Шешуков, А. П. Ковалев, А. М. Орлов, В. В. Позднякова // *Сибирский лесной журнал*. – 2020. – № 2. – С. 14–20. – DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20200202>.

18. Пожары как фактор утраты биоразнообразия и функций лесных экосистем / А. П. Гераськина, Д. Н. Тебенькова, Д. В. Ершов [и др.] // *Вопросы лесной науки*. – 2021. – Т. 4, № 2. – DOI: <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202142-11>.

19. Семенов, М. А. Прогноз адаптивных приспособлений в лесном хозяйстве в связи с возможными климатическими изменениями / М. А. Семенов, А. А. Высоцкий, В. И. Пашенко // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. – 2019. – № 5(371). – С. 57–69. – DOI <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.57>.

20. Исследование участков леса, подверженных влиянию короеда-типографа (*Ips typographus*) в заповеднике "Курильский" (о. Кунашир) / Н. Р. Пирцхалава-Карпова, А. А. Карпов, М. Ю. Грищенко, Е. Е. Козловский // *Лесотехнический журнал*. – 2020. – Т. 10, № 1(37). – С. 50–59. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.1/5>. – EDN UDPRQU.

21. Долгих, С. А. Об изменении повторяемости неблагоприятных и экстремальных метеорологических явлений на территории Ертисского бассейна / С. А. Долгих, Е. Ю. Смирнова // *Гидрометеорология и экология*. – 2020. – № 4 (99). – С. 135–153. – URL: <https://www.elibrary.ru/muxtoz>.

22. Climate-driven acceleration in forest evapotranspiration fuelling extreme rainfall events in the Himalaya / N. Singh, J. Singh, P. Chauhan [et al.] // *Environmental Research Letters*. – 2021. – Vol. 16, No. 8. – P. 084042. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac14ed>.

23. Семенов, М. А. Оценка уязвимости лесного хозяйства лесостепной и степной зон Европейской части России к наиболее вероятным изменениям климата / М. А. Семенов, О. В. Комарова // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*. – 2022. – № 3. – С. 76–85. – DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2022/3/76-85>. – EDN OPEPYV.

24. Константинов, А. В. Методический подход к оценке адаптационного потенциала лесных экосистем Российской Федерации / А. В. Константинов, С. М. Матвеев // *Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства*. – 2020. – № 2. – С. 14–33. – DOI: <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2020.2.14>. – EDN DGYYYZ.

25. Оценка состояния и продуктивности высокополнотных сосновых насаждений подтаежно-лесостепного района Средней Сибири / А. А. Вайс, П. В. Михайлов, А. И. Мельник [и др.] // *Лесотехнический журнал*. – 2022. – Т. 12, № 3(47). – С. 26–41. – DOI <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.3/3>. – EDN QPCRYN.

26. Оценка лесов Сибири в условиях глобальных изменений / В. А. Соколов, С. К. Фарбер, Д. Г. Щепашенко [и др.]. – Санкт-Петербург : Издательство «Наукоемкие технологии», 2023. – 326 с. – ISBN 978-5-907804-02-9. – EDN ZOJTAQ.

27. Сергиенко, В. Г. Прогноз влияния изменения климата на разнообразие природных экосистем и видов флористических и фаунистических комплексов биоты России / В. Г. Сергиенко, А. В. Константинов // *Труды*

Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2016. – № 2. – С. 29–44. – EDN WDJUGJ.

28. Оценка состава и структуры лесного покрова Московской области по наземным и дистанционным данным / Т. В. Черненко, М. Ю. Пузаченко, Н. Г. Беляева, О. В. Морозова // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2019. – № 4. – С. 112–124. – DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587-556620194112-124>. – EDN ERYBVU.

29. Медведков, А. А. Климатогенная динамика ландшафтов сибирской тайги в бассейне Среднего Енисея / А. А. Медведков // География и природные ресурсы. – 2018. – № 4. – С. 122–129. – DOI: [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-4\(122-129\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-4(122-129)). – EDN VNXQGA.

30. Иванова, Г. А. Динамика лесных пожаров на территории лесных районов Средней Сибири / Г. А. Иванова, В. А. Иванов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2023. – Т. 4, № 2. – С. 43–48. – DOI: <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2023-4-2-43-48>. – EDN AYVBHS.

31. Бабилова, Н. Н. Анализ данных о лесных пожарах в Республике Коми с помощью Excel и Python / Н. Н. Бабилова, Н. О. Котелина, Ф. Н. Тентюков // Вестник Сыктывкарского университета. Серия 1: Математика. Механика. Информатика. – 2023. – № 4 (49). – С. 29–46. – DOI: [https://doi.org/10.34130/1992-2752\\_2023\\_4\\_29](https://doi.org/10.34130/1992-2752_2023_4_29). – EDN JETQWM.

32. Сорока, А. О. Анализ уровня адаптации лесов в наиболее уязвимых к климатическим изменениям субъектах РФ / А. О. Сорока, И. С. Недбаев, Е. И. Семенова // Столяровские чтения : Материалы научно-практической конференции, посвященной 95-летию академика Д. П. Столярова, Санкт-Петербург, 05 октября 2023 года. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства, 2023. – С. 62–66. – [https://doi.org/DOI 10.21178/05102023.18](https://doi.org/DOI%2010.21178/05102023.18). – EDN YLDMMQ.

33. Дендрохронологическая индикация вспышек размножения филлофагов по радиальному приросту лиственницы в лесостепной зоне Республики Тыва / Т. В. Костякова, Л. В. Белокопытова, Д. Ф. Жирнова [и др.] // Сибирский экологический журнал. – 2021. – Т. 28, № 1. – С. 46–60. – DOI: <https://doi.org/10.15372/SEJ20210105>. – EDN YACDWB.

34. Отто, О. В. Антропогенное воздействие на лесные ресурсы региона на примере Алтайского края / О. В. Отто, А. Г. Редькин, С. С. Слажнева // Региональная экономика и управление: электронный научный журнал. – 2020. – № 4 (64). – С. 18. – EDN CEFWMH.

35. Превентивное управление лесными ресурсами Российской Федерации в условиях климатических изменений / А. В. Константинов, Е. А. Кушнир, Т. С. Королева, И. О. Торжков // Повышение эффективности управления устойчивым развитием лесопромышленного комплекса : Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 90-летию Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г. Ф. Морозова, Воронеж, 15–16 октября 2020 года / Редколлегия: Е. А. Яковлева [и др.]. – Воронеж : Издательство «Знание-М», 2020. – С. 45–50. – DOI: <https://doi.org/10.38006/907345-73-7.2020.45.50>. – EDN SHGDIT.

### References

1. Lukina N. V. Global'nye vyzovy i lesnye ekosistemy [Global challenges and forest ecosystems] *Vestnik Rossijskoj akademii nauk [Bulletin of the Russian Academy of Sciences]*, 2020, Vol. 90, no 6, P. 528-532. DOI 10.31857/S0869587320060080.

2. Vaganov E. A., Porfir'ev B. N., Shirov A. A. [i dr.] Ocenka vklada rossijskih lesov v snizhenie riskov klimaticheskikh izmenenij [Assessing the contribution of Russian forests to reducing the risks of climate change] // *Ekonomika regiona [Economy of the region]*, 2021, Vol. 17, no 4, P. 1096-1109. – DOI 10.17059/ekon.reg.2021-4-4.

3. Boldvin-Kantello, V. Lesa kak centr dejstvij po predotvrashcheniyu global'nogo izmeneniya klimata. *Ustojchivoe lesopol'zovanie [Sustainable forest management]*. 2020, no 3(62), P. 25-26. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43938555>.

4. Loskin M.I., Gotovcev S.P., Pavlova S.A. Processy, svyazannye s izmeneniem klimata, vliyayushhie na ustojchivost' geosistem (na primere Central'noj Jakutii) [Climate change processes that affect the sustainability of geosystems (in the example of Central Yakutia)]. *Prirodoobustrojstvo [Environmental management]*, 2021, no. 1, P. 22–28. DOI 10.26897/1997-6011-2021-1-22-28. (In Russian).
5. Heidari H., Arabi M., Warziniack T. Effects of Climate Change on Natural-Caused Fire Activity in Western U.S. National Forests. *Atmosphere*. 2021, no 12 (981), P. 1–16. DOI: 10.3390/atmos12080981
6. He Z., Pomeroy J. W., Fang X., Peterson A. Sensitivity analysis of hydrological processes to perturbed climate in a southern boreal forest basin. *Journal of Hydrology*. 2021, Vol. 601, P. 126706. DOI 10.1016/j.jhydrol.2021.126706.
7. Konstantinov, A.V. Scenarnyj podhod k adaptacii lesnyh ekosistem Rossijskoj Federacii v usloviyah izmenenij klimata [Scenario approach to adaptation of forest ecosystems of the Russian Federation in the context of climate change]. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya [News of the Russian Academy of Sciences. Geographical series]*. 2023, no 4, P. 558–567. DOI: 10.31857/S2587556623040039. (In Russian).
8. I.O. Torzhkov, E.A. Kushnir, A.V. Konstantinov, T.S. Koroleva, S.V. Efimov, S.M. Shkol'nik. Ocenka vliyaniya ozhidaemyh izmenenij klimata na lesnoe hozyajstvo [Assessing the impact of expected climate change on forestry]. *Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and hydrology]*. 2019, no 3, P. 40–50. URL: <http://www.mig-journal.ru/archive?id=4940> (In Russian).
9. Lipka O.N., Korzuhin M.D., Zamolodchikov M.G. [et al.] Rol' lesov v adaptacii prirodnyh sistem k izmeneniyam klimata [The role of forests in the adaptation of natural systems to climate change]. *Lesovedenie [Forestry]*. 2021, no 5, P. 531–546. DOI: 10.31857/S0024114821050077. (In Russian).
10. R. R. Bajturina, A. K. Gabdelxakov, O. V. Xalikova [et al.]. Vliyanie izmenenij klimata na lesny'e resursy` Respubliki Bashkortostan [Climate change on forest resources of the Republic of Bashkortostan.] // *Lesotexnicheskij zhurnal*. – 2020. – T. 10, № 4(40). – S. 99-109. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2020.4/8. – EDN YWUUIJW.
11. D. Candel-Pérez, M. E. Lucas-Borja, A. I. García-Cervigón [et al.] Forest structure drives the expected growth of *Pinus nigra* along its latitudinal gradient under warming climate. *Forest Ecology and Management*. 2022, Vol. 505, P. 119818. DOI 10.1016/j.foreco.2021.119818.
12. Kai, Xu, Xiangping Wang, Chao Jiang, Osbert Jianxin Sun. Assessing the vulnerability of ecosystems to climate change based on climate exposure, vegetation stability and productivity. *Forest Ecosystems*. 2020. Vol. 7, Article number: 23. URL: <https://forestecosyst.springeropen.com/articles/10.1186/s40663-020-00239-y#citeas>.
13. V. Fomin, N. Ivanova, A. Mikhailovich, E. Zolotova .Problem of climate-driven dynamics in the genetic forest typology. AIP Conference Proceedings : 4th International Conference on Modern Synthetic Methodologies for Creating Drugs and Functional Materials, MOSM 2020, Yekaterinburg, 16–20. 11. 2020. Vol. 2388, Issue 1. *American Institute of Physics Inc. : American Institute of Physics Inc.*, 2021. – P. 030007. – DOI 10.1063/5.0068806.
14. Hinze, J. A. Albrecht, H.-G. Michiels Climate-Adapted Potential Vegetation – A European Multiclass Model Estimating the Future Potential of Natural Vegetation. *Forests*, 2023, no 14, P. 1–19, DOI: 10.3390/f14020239.
15. Kuznecova N. F., Sautkina M. Yu. Sostoyanie lesov i dinamika ih porodnogo sostava v Central'nom federal'nom okruge [State of forests and dynamics of their species composition in the Central Federal District]. *Lesohozyajstvennaya informaciya [Forestry information]*, 2019, no 2, pp. 25-45. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2019.2.03.
16. Sun Q., Baxter R., Burrell A. [et al.] Climate variability may delay post-fire recovery of boreal forest in Southern Siberia, Russia. *Remote Sensing*. 2021, Vol. 13, No. 12. DOI 10.3390/rs13122247.
17. Sheshukov M.A., Kovalev A.P., Orlov A.M., Pozdnyakova V.V.. Problemy i perspektivy ohrany lesov ot pozharov [Problems and prospects for protecting forests from fires]. *Sibirskij lesnoj zhurnal [Siberian Forest Journal]*. 2020, no 2, pp. 14–20. DOI 10.15372/SJFS20200202.
18. Geraskina A.P., Tebenkova D.N., Ershov D.V. [et al.] Pozhary kak faktor utraty bioraznoobraziya i funkcij lesnyh ekosistem [Fires as a factor in the loss of biodiversity and functions of forest ecosystems]. *Voprosy lesnoj nauki [Questions of forest science]*. 2021, Vol. 4, no 2. DOI 10.31509/2658-607x-202142-11.

19. Semenov, M. A., Vysockij A. A., Pashchenko V. I. Prognoz adaptivnyh prispособlenij v lesnom hozyajstve v svyazi s vozmozhnymi klimaticheskimi izmeneniyami [Forecast of adaptive adaptations in forestry in connection with possible climate changes] *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal [News of higher educational institutions. Forest Journal]*. 2019, no 5(371), P. 57-69. DOI 10.17238/issn0536-1036.2019.5.57.

20. N. R. Pirczhalava-Karpova, A. A. Karpov, M. Yu. Grishhenko, E. E. Kozlovskij. Study of forest areas susceptible to the influence of the bark beetle (*Ips typographus*) in the Kurylyosky Nature Reserve (Kunashir Island) // *Lesotekhnicheskii zhurnal*. – 2020. – Vol. 10, № 1(37). – P. 50-59 (In Russian). – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2020.1/5. – EDN UDPRQU.

21. Dolgih S.A., Smirnova E.Ju. Ob izmenenii povtorjaemosti neblagoprijatnyh i jekstremal'nyh meteorologicheskikh javlenij na territorii Ertisskogo bassejna [On changes in the repeatability of adverse and extreme meteorological events in the territory of the ertis basin]. *Gidrometeorologija i jekologija [Hydrometeorology and ecology]*, 2020, no. 4 (99), P. 135–153. (In Russian).

22. Singh N., Singh J., Chauhan P. [et al.] Climate-driven acceleration in forest evapotranspiration fuelling extreme rainfall events in the Himalaya. *Environmental Research Letters*. 2021, Vol. 16, No. 8, P. 084042. DOI 10.1088/1748-9326/ac14ed.

23. Semenov M. A., Komarova O. V. Ocenka uyazvimosti lesnogo hozyajstva lesostepnoj i stepnoj zon Evropejskoj chasti Rossii k naibolee veroyatnym izmeneniyam klimata. [Assessing the vulnerability of forestry in the forest-steppe and steppe zones makes parts of Russia most likely to experience climate change] *ulletin of Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya [Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology]*, 2022, no 3, P. 76-85 (In Russian).

24. Konstantinov, A. V. Metodicheskij podhod k ocenke adaptacionnogo potenciala lesnyh ekosistem Rossijskoj Federacii [Methodological approach to assessing the adaptive potential of forest ecosystems of the Russian Federation]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo hozyajstva [Proceedings of the St. Petersburg Research Institute of Forestry]*, 2020, no 2, P. 14-33 (In Russian).

25. A. A. Vajs, P. V. Mixajlov, A. I. Mel`nik [et al.]. Assessment of the condition and productivity of high-density pine plantations in the subtaiga-forest-steppe region of Central Siberia // *Lesotekhnicheskii zhurnal*. – 2022. – Vol. 12, № 3(47). – P. 26-41 (In Russian). – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.3/3. – EDN QPCRYN.

26. V. A. Sokolov, S. K. Farber, D. G. Shchepashchenko [et al.]. Ocenka lesov Sibiri v usloviyah global'nyh izmenenij [Assessment of Siberian forests in the context of global changes]. Sankt-Peterburg : Izdatel'stvo “Naukoemkie tekhnologii” [St. Petersburg: Publishing House “Science-Intensive Technologies”], 2023, 326 p. (In Russian).

27. Sergienko V. G., Konstantinov A. V. Prognoz vliyaniya izmeneniya klimata na raznoobrazie prirodnyh ekosistem i vidov floristicheskikh i faunisticheskikh kompleksov bioty Rossii [Forecast of the impact of climate change on the diversity of natural ecosystems and species of floristic and faunal complexes of the biota of Russia]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo hozyajstva [Proceedings of the St. Petersburg Research Institute of Forestry]*, 2016, no 2, P. 29-44 (In Russian).

28. T.V.Chernen`kova ,M.Yu Puzachenko , N.G. Belyaeva , O.V.Morozova / Ocenka sostava i struktury` lesnogo pokrova Moskovskoj oblasti po nazemny`m i distancionny`m dannym [Assessment of the composition and structure of forest cover in the Moscow region using ground-based and remote data] // *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. – 2019. – № 4. – S. 112-124 . – DOI 10.31857/S2587-556620194112-124. – EDN ERYBVU..

29. Medvedkov A. A. Klimatogennaya dinamika landshaftov sibirskoj tajgi v bassejne Srednego Eniseya [Climatogenic dynamics of Siberian taiga landscapes in the Middle Yenisei basin]. *Geografiya i prirodnye resursy [Geography and natural resources]*. 2018, no 4, P. 122-129. DOI 10.21782/GIPR0206-1619-2018-4(122-129) (In Russian).

30. Ivanova G. A., Ivanov V. A. Dinamika lesnyh pozharov na territorii lesnyh rajonov Srednej Sibiri [Dynamics of forest fires in the forest areas of Central Siberia]. *Interexpo Geo-Siberia*. 2023, Vol. 4, no. 2, P. 43-48. DOI 10.33764/2618-981X-2023-4-2-43-48 (In Russian).

31. Babikova, N. N. Analiz dannyh o lesnyh pozharah v Respublike Komi s pomoshch'yu Excel i Python [Analysis of data on forest fires in the Komi Republic using Excel and Python]. Vestnik Syktyvkar'skogo universiteta. Seriya 1: Matematika. Mekhanika. Informatika [Bulletin of Syktyvkar University. Series 1: Mathematics. Mechanics. Computer science]. 2023, no 4(49), P. 29-46. DOI 10.34130/1992-2752\_2023\_4\_29(In Russian).
32. Soroka A.O., Nedbaev I.S., Semenova E.I. Analiz urovnya adaptacii lesov v naibolee uyazvimy`x k klimaticheskim izmeneniyam sub`ektax RF [Analysis of the level of forest adaptation in the most vulnerable regions of the Russian Federation to climate change]. Stolyarovskie chteniya [Stolyarov readings], 2023, pp. 62–66. (In Russian).
33. Kostyakova T.V., Belokopytova L.V., Zhirnova D.F. Dendroxronologicheskaya indikaciya vspy`shek razmnozheniya fillofagov po radial`nomu prirostu listvennicy v lesostepnoj zone Respubliki Ty`va [Dendrochronological indication of outbreaks of reproduction of phyllophages based on the radial growth of larch in the forest-steppe zone of the Republic of Tyva]. Sibirskij e`kologicheskij zhurnal [Siberian Ecological Journal], 2021, no. 2 (28), pp. 46–60. (In Russian).
34. Otto O.V., Red`kin A.G., Slazhneva S.S. Antropogennoe vozdejstvie na lesny`e resursy` regiona na primere Altaj'skogo kraja [Anthropogenic impact on forest resources of the region using the example of the Altai Territory]. Regional`naya e`konomika i upravlenie [Regional economics and management], 2020, no. 4 (64), p. 18. (In Russian).
35. Konstantinov A.V., Kushnir E.A., Koroleva T.S., Torzhkov I.O. Preventivnoe upravlenie lesny`mi resursami Rossijskoj Federacii v usloviyax klimaticheskix izmenenij [Preventive management of forest resources of the Russian Federation in the context of climate change]. Povy`shenie e`ffektivnosti upravleniya ustojchivy`m razvitiem lesopromy`shlennogo kompleksa [Increasing the efficiency of management of sustainable development of the timber industry complex], 2020, pp. 45–50. (In Russian).

### Сведения об авторах

✉ Семёнова Екатерина Игоревна – младший научный сотрудник, ФБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства», Институтский пр., 21, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 194021, ORCID: <http://orcid.org/> <https://orcid.org/0000-0003-2176-845>, e-mail: [e.semenova@spb-niilh.ru](mailto:e.semenova@spb-niilh.ru).

✉ Сорока Анастасия Олеговна – младший научный сотрудник, ФБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства», Институтский пр., 21, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 194021, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0602-34>, e-mail: [a.soroka@spb-niilh.ru](mailto:a.soroka@spb-niilh.ru).

✉ Недбаев Иван Сергеевич – младший научный сотрудник, ФБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства», Институтский пр., 21, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 194021; ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», Университетская наб., д. 7–9, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 199034, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0407-7585>, e-mail: [i.nedbaev@spb-niilh.ru](mailto:i.nedbaev@spb-niilh.ru).

### Information about the authors

✉ *Ekaterina I. Semyonova* – junior researcher, St. Petersburg Research Institute of Forestry, Institut'sky Prospekt, 21, St. Petersburg, Russian Federation, 194021, ORCID: <http://orcid.org/> <https://orcid.org/0000-0003-2176-845>, e-mail: [e.semenova@spb-niilh.ru](mailto:e.semenova@spb-niilh.ru).

*Anastasia O. Soroka* – junior researcher, St. Petersburg Research Institute of Forestry, Institut'sky Prospekt, 21, St. Petersburg, Russian Federation, 194021, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0602-34>, e-mail: [a.soroka@spb-niilh.ru](mailto:a.soroka@spb-niilh.ru).

*Ivan S. Nedbaev* – junior researcher, St. Petersburg Research Institute of Forestry, Institut'sky prospekt, 21, St. Petersburg, Russian Federation, 194021; St. Petersburg State University, Universitetskaya naberezhnaya, 7–9, St. Petersburg, 199034, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0407-7585>, e-mail: [i.nedbaev@spb-niilh.ru](mailto:i.nedbaev@spb-niilh.ru).

✉ – Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/3>

УДК 630\*52



## Моделирование роста производных сосняков брусничного типа леса разной густоты в Мурманской области

Сергей В. Третьяков<sup>1,2</sup>, [s.v.tretyakov@narfu.ru](mailto:s.v.tretyakov@narfu.ru) <https://orcid.org/0000-0001-5982-3114>

Александр П. Богданов<sup>1</sup> [aleksandr\\_bogd@mail.ru](mailto:aleksandr_bogd@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0002-1655-7212>

Илья В. Цветков<sup>1,2</sup>, [i.tsvetkov@narfu.ru](mailto:i.tsvetkov@narfu.ru) <https://orcid.org/0000-0002-1559-3254>

Александр В. Давыдов<sup>1</sup>, [davydov.a@edu.narfu.ru](mailto:davydov.a@edu.narfu.ru) <https://orcid.org/0000-0003-4328-7040>

Алексей А. Карабан<sup>1</sup>, [karaban.a@edu.narfu.ru](mailto:karaban.a@edu.narfu.ru) <https://orcid.org/0000-0002-2934-0303>

<sup>1</sup>ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства», ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, 163062, Россия

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, 163002, Россия

В целях совершенствования нормативов и повышения точности лесотаксационных работ проведено моделирование хода роста сосновых древостоев в брусничном типе леса в притундровых лесах Мурманской области. В процессе моделирования хода роста использованы методы аналитического выравнивания таксационных показателей и анализа материалов перечислительной таксации. В 2023 году проведены повторные перечеты на постоянных пробных площадях в Мурманской области, заложенных в 1962 году и повторно протаксированных в 1967 и 1972 годах. Учтены исследования одного из основоположников притундрового лесоводства, В.Ф. Цветкова, о разделении сосняков брусничных на типы формирования по густоте на умеренно густые и перегущенные. Материалы сгруппированы и выровнены, по результатам обработки получены динамические ряды таксационных показателей древостоев, которые представлены в форме уравнений. Получены значения эмпирических коэффициентов уравнения высоты или диаметра древостоя от возраста в перегущенных и умеренной густоты сосняках брусничных, характеризующих высокую тесноту связи ( $R^2 = 0,86-0,97$ ) связь между признаками статистически значима ( $p < 0,05$ ). Исследуемые древостои испытывают значительное влияние природных условий на крайнем пределе произрастания, что, прежде всего, сказывается на динамике роста в высоту. Полученные значения высот деревьев свидетельствует о том, что модальные сосновые древостои в брусничном типе леса растут по IV-V классам бонитета.

**Ключевые слова:** сосняк брусничный, *Pinus sylvestris* L., моделирование, ход роста, притундровые леса

**Финансирование:** Публикация подготовлена по результатам НИР, выполненных в рамках государственного задания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований в сфере деятельности Федерального агентства лесного хозяйства «Разработка лесотаксационных нормативов для насаждений сосны обыкновенной на северном пределе их распространения, расположенных на границе с открытыми пространствами: тундрами, водно-болотными участками (морем) в районе притундровых лесов и редкостойной тайги и в защитных лесах северо-таежного района европейской части Российской Федерации и разработка рекомендаций по ведению в них хозяйства» (регистрационный номер: 122012600067-9).

**Благодарности:** авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.


**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



**Для цитирования:** Моделирование роста производных сосняков брусничного типа леса разной густоты в Мурманской области / С. В. Третьяков, А. П. Богданов, И. В. Цветков, А. В. Давыдов, А. А. Карабан // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 1 (53). – С. 35–53. – Библиогр.: с. 48–52 (27 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/3>.

Поступила 07.08.2023. Пересмотрена 05.12.2023. Принята 29.01.2024. Опубликовано онлайн 20.03.2024.


Article

### Modelling the growth of secondary cowberry pine forest of different densities in Murmansk region

Sergey V. Tretyakov<sup>1,2</sup>, [s.v.tretyakov@narfu.ru](mailto:s.v.tretyakov@narfu.ru)  <https://orcid.org/0000-0001-5982-3114>

Alexander P. Bogdanov<sup>1,2</sup>, , [aleksandr\\_bogd@mail.ru](mailto:aleksandr_bogd@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-1655-7212>

Ilya V. Tsvetkov<sup>1,2</sup>, [i.tsvetkov@narfu.ru](mailto:i.tsvetkov@narfu.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-1559-32540>

Alexander V. Davydov<sup>1,2</sup>, [davydov.a@edu.narfu.ru](mailto:davydov.a@edu.narfu.ru)  <https://orcid.org/0000-0003-4328-7040>

Alexey A. Karaban<sup>1,2</sup>, [karaban.a@edu.narfu.ru](mailto:karaban.a@edu.narfu.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-2934-0303>

<sup>1</sup>Northern Research Institute of Forestry, Nikitova, str., 13, Arkhangelsk, 163062, Russia

<sup>2</sup>Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Severnaya Dvina Emb. 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation

#### Abstract

In aiming to improve the standards and increase the accuracy of forest taxation works, modeling of the growth of pine stands in the cowberry type of forest in the zone of tundra forests of the Murmansk region was carried out. In the process of modeling the course of growth, methods of analytical alignment of taxation indicators and analysis of enumerative taxation materials were used. Trial areas were used to study the course of growth. In 2023, repeated recounts were carried out on permanent test areas in the Murmansk Region, laid down in 1962 and repeated recounts in 1967 and 1972. V.F. Tsvetkov research is taken into account, one of the founders of tundra forestry, on the division into types of formation of cranberry pine forests by density into moderately dense and overgrown. The values of empirical coefficients of the equation of stand height or diameter from age in overdrained and moderately dense lingonberry pine forests, characterising high closeness of relationship ( $R^2=0,86-0,97$ ) the relationship between the signs is statistically significant ( $p < 0.05$ ). The stands under study are significantly influenced by natural conditions at the extreme limit of growth, which primarily affects the dynamics of growth in height. The materials are grouped and aligned, according to the results of processing, dynamic series of taxational indicators of stands are obtained, which are presented in the form of equations. The obtained height values indicate that modal pine stands in the cowberry type of forest grow according to IV-V classes of bonitet.

**Keywords:** cowberry pine forest, *Pinus sylvestris* L., modelling, growth process, tundra forests.

**Funding:** The publication was prepared based on the results of research carried out as part of the state task of the FBU "NRIF" to conduct applied scientific research in the field of activity of the Federal Forestry Agency "Development of forest inventory standards for Scots pine plantations at the northern limit of their distribution, located on the border with open spaces: tundra, wetland areas (sea) in the area of tundra forests and sparse taiga and in protective forests of the north-taiga region of the European part of the Russian Federation and the development of recommendations for managing them" (registration number of the topic: 122012600067-9).

**Acknowledgments:** authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.



**For citation:** Tretyakov S. V., Bogdanov A. P., Tsvetkov I. V., Davydov A. V., Karaban A. A. (2024). Modelling the growth of secondary cowberry pine forest of different densities in Murmansk region. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 1 (53), pp. 35-53 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/3>.

**Received** 07.08.2023. **Revised** 05.12.2023. **Accepted** 29.01.2024. **Published online** 20.03.2024.

## Введение

Ведение лесного хозяйства в притундровых лесах связано с необходимостью учитывать их защитный статус, закрепленный в статье 115 ЛК РФ<sup>1</sup>. Леса, признанные притундровыми, имеют высокое природоохранное значение. Притундровые леса (крайнего Севера, лесотундровые, арктические и т.д.) оказывают важные экосистемные услуги, включая, как приведено у Н.В. Лукиной и др. [1]:

– обеспечивающие услуги в виде древесины, недревесных лесных ресурсов;

– регулирующие услуги (контроль эрозии, регулирование климата, водорегулирующие функции, средообразующие и др.);

– поддерживающие услуги (почвообразование, фотосинтез и др.);

– культурные услуги (духовные и религиозные, рекреационные, образовательные, традиционные и др.) и другие услуги.

Притундровые леса играют важную роль в формировании климатических условий на планетарном, региональном и локальном уровнях. Это своеобразный эволюционный сформировавшийся биом на контакте природных зон тайги и тундры<sup>2</sup>. Как отмечают С.Т. Им и др. (2020), в настоящее время на севере эта полоса расширяется за счет участков островных, долинно-приречных лесов, редколесий и криволесий, вклинивающихся в тундру, а также за счет постепенного зарастания открытых пространств травянисто-кустарничковой и древесной

растительностью [2]. В этом контексте необходимость изучения влияния изменения климата на рост и особенности адаптации к нему сосновых древостоев различных типов леса подчеркивают P. González-Díaz et al. [3], B. Méndez-Cea et al. [4] и J.M. Housset et al. [5]. Ожидается, что в условиях изменения климата наиболее сильное воздействие на рост древесных растений будет наблюдаться на границах ареалов видов. При этом J.M. Housset et al. отводят ключевую роль акклиматизации деревьев [5]. По мнению S. Shah et al. (2020), Е. Лопатина (2016), открытым остается вопрос о южной и северной границах притундровых лесов, которые, соответственно, изменяются под воздействием изменения климата, в связи с этим ранее разработанные таблицы хода роста нуждаются в актуализации<sup>3</sup> [6, 7].

Основоположниками притундрового лесоводства установлено, что лесные фитоценозы, на пунктах наблюдения (66° с. ш.) снижают скорость ветра, движущегося с безлесных пространств Арктики. Зона ослабления ветра на подветренной стороне в притундровых лесах составляет до 200 м и равна 20–30 средним высотам древостоев. Благодаря климаторегулирующей роли притундровых лесов наблюдается отличающаяся динамика числа дней с сильной скоростью ветра в разных лесорастительных зонах и подзонах европейской части России<sup>4,5</sup>.

На северных пределах произрастания сосен (*Pinus sylvestris* L.) А.В. Давыдов и др. (2023) указывают на существенную ветровую нагрузку на

<sup>1</sup> Лесной кодекс Российской Федерации: [принят Гос. Думой 8 ноября 2006 г.: в ред. от 01.09.2023]. 2006. 144с.

<sup>2</sup> Семенов Б.А., Цветков В.Ф. Исследования в притундровых лесах. Наука- лесному хозяйству Севера. Сборник научных работ института лесного хозяйства. Архангельск. 1999. С. 20-25.

<sup>3</sup> Сериков М.Т. Основы математического моделирования в лесоустойстве : учебное пособие. Воронеж, 2016. 107 с. URL: <https://znanium.com/catalog/document?id=292362>.

<sup>4</sup> Семенов Б.А., Елизаров Ф.П. Влияние лесной растительности Крайнего Севера на скорость ветра и распределение снега. Экологически исследования в лесах Европейского Севера. Архангельск: АИЛиЛХ, 1991. С. 16-26.

<sup>5</sup> Семенов Б.А. Цветков В.Ф., Чибисов Г.А., Елизаров Ф.П. Притундровые леса европейской части России: природа и ведение хозяйства. Архангельск: СевНИИЛХ. 1998. 332 с.

кроны древостоев, препятствующую росту стволов в высоту [8].

Кроме того, исследователи мерзлотных почв отмечают достаточное количество кальция и фосфора в их химическом составе, но указанные минеральные элементы находятся на той глубине почвы, которая оттаивает именно к концу лета. В связи с чем корням, которые на 60-80 % располагаются на глубине около 10 см, трудно обогащать древостой питательными веществами, что усугубляется также низким содержанием азота в почвах притундровых лесов. Доступным остается именно гумус, количество которого считается достаточным. Общий недостаток питания приводит к сильной корневой конкуренции, которая усиливается с повышением густоты древостоя. При этом распространенность древостоев с относительной полнотой 0,5 является дополнительным фактором для возникновения подроста под разреженным пологом<sup>6, 7, 8</sup>.

Повышенная корневая конкуренция и влияние ветровой нагрузки в сочетании с пониженными температурами воздуха и земной поверхности приводят к формированию сосняков преимущественно V класса бонитета на северном пределе произрастания.

Главным фактором, который влияет на появление всходов в притундровых сосняках, считается пирогенное влияние. При нем почва очищается от напочвенного покрова и лесной подстилки, обогащается питательными веществами от сгоревшего органического вещества. В связи с тем, что напочвенный покров после пожара восстанавливается медленно, напочвенная среда остается благоприятной для восприятия семян. Самая высокая численность жизнеспособного подроста и самосева сосны (*P. sylvestris* L.) наблюдается под пологом сосняков брусничных при давности пожара – от 15 до 25 лет, при давности пожара до 30-40 лет подрост наблюдается только в сосняках лишайниковых. Через 40-50 лет после пожара подрост первых послепожарных поколений начинает отмирать. В дальнейшем отпад

начинает превышать возобновление, до момента возникновения нового пожара. На успешность самовозобновления сосны на гари влияет почвенные условия. По результатам исследований О.И. Гавриловой [9], максимальная численность сосны (*P. sylvestris* L.) отмечается на скальных возвышениях, а понижениях доминирует береза (*Betula pendula* Roth). И.Н. Кутявин и др. (2020) [10], И.Н. Кутявин и А.В. Манов (2019) [11], Е.А. Робакидзе и К.С. Бобкова (2022) [12], А.В. Манов и И.Н. Кутявин (2018) [13] считают отличительной особенностью формирования сосняков широкую представленность лесовозобновительных процессов послепожарного типа. Изучение постпирогенной динамики структуры древостоя сосны (*P. sylvestris* L.) остается актуальной задачей.

При указанной особенности естественного возобновления наблюдается высокая разновозрастность сосны (*P. sylvestris*) и сопутствующих пород в молодых поколениях, выраженная доминированием главной породы на преобладающей части площадей. В связи с медленным ростом всех древесных пород конкурентное влияние лиственных на главную породу заметно ослаблено. При формировании производных насаждений в сосняках участвует также молодое поколение ели (*Picea Abies* L.), которая не имеет преобладающей доли в составе подроста<sup>9</sup>.

Спелые и перестойные древостои *P. sylvestris*, пройденные низовыми пожарами, отличаются лучшим ростом, но реагируют по-разному. В отличие от спелых древостоев (130-140 лет), рост которых увеличивается, нередко достигая второго максимума прироста, у перестойных сосен рост остается замедленным и не отличается от прироста до пожара. В сосняках, не тронутых рубками и пройденных пожарами невысокой интенсивности, отрицательное влияние пожара на прирост высоты не является значительным (около 10 %). После пожаров и последующих санитарных рубок, связанных в основном с уборкой сухостоя, древостой *P. sylvestris* снижает

<sup>6</sup> Семенов Б.А. Цветков В.Ф., Чибисов Г.А., Елизаров Ф.П. Притундровые леса европейской части России: природа и ведение хозяйства. Архангельск: СевНИИЛХ. 1998: 332 с.

<sup>7</sup> Лесная энциклопедия. Т. 1. М: Советская Энциклопедия, 1985. 563 с.

<sup>8</sup> Цветков В.Ф. Этюды экологии леса. Архангельск: АГТУ, 2009; 354 с.

<sup>9</sup> Цветков В.Ф. Эскизы таблиц хода роста сосновых древостоев разных типов формирования в Мурманской области. Архангельск. 1992: 16 с.

прирост в высоту, но увеличивает прирост по диаметру. В насаждениях с низовыми пожарами, не наносящих заметного ущерба древостоям, при снижении роста в высоту прирост по диаметру практически не изменяется. Соответственно, возникает необходимость регулирования притундровых сосняков несплошными рубками для улучшения последующего возобновления, что также отвечает потребностям местного населения в древесине, на которую указывают О.Н. Тюкавина и А.П. Феклистов (2019) [14] и другие ученые<sup>10, 11</sup>.

Согласно лесоводственным рекомендациям 1970-х годов, в разновозрастных притундровых сосняках следует проводить двухприемные постепенные рубки с выполнением мер содействия естественному возобновлению. В первый прием (интенсивность 40-50 % по запасу) предполагалось удалять *P. sylvestris* старше 180-200 лет и нежелательные деревья, регулировать состав подроста. Второй прием можно было повторять через 30-50 лет. В условиях разновозрастных сосняков в первый прием предполагалось вырубать наиболее старые деревья (35-45 % запаса). Окончательная рубка задумывалась через 40-60 лет<sup>1</sup>.

Сосняки брусничные 6-7 классов возраста с выборочными рубками интенсивностью 30-40 % через 10-20 лет характеризуются относительной полнотой 0,3-0,4 при запасе древесины 60-80 м<sup>3</sup>/га. Рост сосняков брусничных интенсивнее, чем в лишайниковом типе леса. Прирост после рубки увеличивается в первые 3-6 лет, после чего наблюдается его постепенное снижение. На вырубках, при наличии предварительного подроста, формируются разновозрастные сосняки с березой. При отсутствии подроста и наличии источников семян возникают разреженные древостои, составленные не менее 50-60 % березой (*Betula pendula* Roth.) и сосной (*P. sylvestris* L.) с участием осины (*Populus tremula* L.), под пологом которых формируется ель (*Picea Abies* L.)<sup>6</sup> [15].

В притундровых сосняках следует проводить низкоинтенсивные рубки. При этом необходимо руководствоваться накопленными знаниями о динамике роста сосновых древостоев. В настоящее время таблицы хода роста сосны Крайнего Севера, которые распространяется на Европейскую часть России, частично включены в лесотаксационный справочник<sup>14</sup>. Для устойчивого лесопользования и эффективного планирования лесохозяйственных мероприятий необходимо разработать лесохозяйственные нормативы, применение которых будет соответствовать положениям климатической доктрины Российской Федерации. Ведение рационального и научно обоснованного лесного хозяйства в притундровых лесах невозможно без изучения природы этих экосистем<sup>12</sup>[6, 16].

Интерес к притундровым лесам обуславливается рядом факторов:

- арктическая зона РФ особенно сильно подвержена различным климатическим воздействиям;
- традиционное непромышленное использование лесов коренными малочисленными народами Севера;
- требуют специфических приемов ведения в них хозяйства.

Авторами продолжена работа в направлении планомерных исследований притундровых лесов, которые впервые были выполнены Архангельским институтом леса и лесохимии (в настоящее время – Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, СевНИИЛХ) в 1950-х годах под руководством академика Ивана Степановича Мелехова и связаны с влиянием интенсивного освоения природных ресурсов Крайнего Севера. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**

Изучение сосновых лесов позволило сотрудникам СевНИИЛХ разработать таблицы хода роста сосны по типам леса и типам формирования древостоя, однако предельный возраст таблиц равен

<sup>10</sup> Чертовской В.Г., Семенов Б.А., Шамин А.А. Практическое пособие по исследованию притундровых лесов. Архангельск: Архангельский институт леса и лесохимии, 1977. 35 с.

<sup>11</sup> Воронин В.В. Ведение лесного хозяйства в притундровых лесах Архангельской области, история и современность. Современные

проблемы притундровых лесов: Материалы Всероссийской конференции с международным участием, Архангельск. 2012: 214-219.

<sup>12</sup> Указ Президента Российской Федерации от 26.10.2023 № 812 «Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации». Москва: Кремль, 2023. 22 с.

60 лет, что ограничивает использование их на практике. Данные таблицы использовались как вспомогательный источник информации<sup>13</sup> [17].

Существуют различные типологические схемы для притундровых сосняков Европейской части России. Исследователями сосняков на крайнем пределе произрастания выделены типы сосновых лесов: сосняк брусничный, лишайниковый и бруснично-лишайниковый, однако в справочной литературе данный тип леса не приведен<sup>14</sup>. В настоящей работе авторы придерживались типологии, приведенной в справочной литературе.

Целью исследования является разработка эмпирических коэффициентов для общепринятых уравнений связи таксационных показателей с возрастом в сосняках брусничных различной густоты в притундровых лесах Мурманской области.

### Материалы и методы

#### *Объект и предмет исследования*

Объектом исследования является сосняк брусничный в различных типах формирования на территории Мурманской области.

Предмет исследования: изучение хода роста и математическое моделирование изменения таксационных характеристик древостоев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) с возрастом.

Для изучения хода роста сосновых насаждений брусничного типа леса в 2023 году проведены полевые исследования на стационарных объектах, которые заложены в 1962 году и использованы результаты повторных пересчетов 1967 и 1972 годов. Пробные площади расположены в 267 кв. Оленегорского участкового лесничества Мончегорского лесничества Мурманской области<sup>15</sup> в соответствии с рис. 1 (высота над уровнем моря составляет 160 м). С 1985 года указанные объекты относятся к генетическому резервату, представляющему собой высокопроизводительные сосновые насаждения Крайнего Севера, который с 2003 года находится в границах регионального заказника «Симбозерский»<sup>16</sup>. В 2023 году авторами проведена повторная таксация на стационарных пробных площадях и закладка новых объектов в том же квартале.

---

<sup>13</sup> Семенов Б.А., Паршевников А.Л. Типологические схемы притундровых лесов и редколесий Архангельской области и Республики Коми. Архангельск: СевНИИЛХ, 2000: 20с.

<sup>14</sup> Войнов Г.С. Лесотаксационный справочник по северо-востоку Европейской части Российской Федерации (нормативные материалы для Ненецкого автономного округа, Архангельской, Вологодской области и республики Коми). Архангельск, 2012: 672 с.

<sup>15</sup> Цветков В.Ф. Сосняки Кольской лесорастительной области и ведение хозяйства в них. Архангельск: АГТУ. 2002: 380.

<sup>16</sup> Лесохозяйственный регламент Мончегорского лесничества Мурманской области (в редакции от 11.06.2019). Мурманск: Министерство природных ресурсов и экологии Мурманской области, 2018: 155.



Рисунок 1. Расположение изучаемых участков сосняка брусничного в различных типах формирования на территории Мурманской области

Figure 1. The location of the studied sites of lingonberry pine forest in various types of formation on the Murmansk region

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

Изучаемые сосняки являются производными после лесного пожара и сплошной рубки в 1930-х годах. Древостои характеризуются выраженным преобладанием сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.), однородностью по строению, пространственной

структуре и разделены по густоте на умеренно густые и перегущенные в соответствии с разработанными типами формирования. На рис. 2 приведены фотографии пробных площадей № 1 (а) и № 5 (б), отнесенных к различным типам формирования.



а | а      б | б

Рисунок 1. Сосняк брусничный: а – на ПП № 1\*23 (умеренно густой); б – на ПП № 5\*23 (перегущенный)  
Figure 1. Cowberry pine on study site: а – № 1\*23 (moderately thick); б – № 1\*23 (overloaded)

Источник: Фото Богданова А.П.  
Source: Photo by Bogdanov A.P.

### Сбор данных

Для разработки эмпирических уравнений связи таксационных показателей с возрастом древостоя проведены этапы:

– подготовительный, включающий поиск доступной информации и получение данных лесоустройства, подбор участков, систематизация архивных данных, обзор литературных источников, выбор метода проведения полевых работ и обработки данных;

– полевые работы, включающий сбор данных с использованием утвержденных методик проведения подобных работ<sup>17</sup>;

– камеральные работы, включающий составление уравнений с помощью прикладных программ.

Пробные площади были заложены с учетом ОСТ 56-69-83 «Площади пробные лесостроительные. Метод закладки». Стандарт предусматривает закладку прямоугольных и близких к ним по форме пробных площадей, ограниченных визирами. Для выдержки формы прямоугольника углы определяли при помощи буссоли Suunto KB-14/360R с точностью  $1/3^\circ$ . Для определения координат использовался GPS-навигатор Garmin 64 (погрешность при определении местоположения по GPS может определяться с точностью до  $\pm 3,65$  м).

Подбор участков проводили на типологической основе, т.е. выбор пробных площадей производился из брусничного типа леса IV-V классов бонитета, с учетом проведенных ранее исследований в этом направлении<sup>18</sup>. После отграничения пробной площади и фиксации координат в GPS-навигаторе производилась перечислительная таксация древостоя. На каждой пробной площади был проведен сплошной пересчет деревьев при помощи мерной вилки (Mantax Blue, Haglof) с точностью 0,1 см. При индивидуальном пересчете деревьев проводились измерения диаметра на высоте 1,3 метра по точной

шкале, по породам и категориям технической годности. Во избежание повторного измерения дерева каждое дерево маркировалось мелом. Высоты измерялись высотомером Suunto PM-5/1520 PC (разрешающая способность  $\pm 1-2\%$ ) у 10-15 модельных деревьев сосны (*P. sylvestris* L.) разной толщины, с точностью  $\pm 0,1$  м.

Для визуализации пространственного расположения пробных площадей использовалась ГИС QGIS 2.10.

### Анализ данных

Исходными данными для получения эмпирических коэффициентов и уравнения связи между таксационными показателями и возрастом древостоя являлись результаты полевых обследований на стационарных объектах, приведенные в табл. 1, и результаты исследования одного из основоположников притундрового лесоводства, В.Ф. Цветкова.

Ход роста древостоев анализировали традиционными лесоводственно-таксационными методами. В основу положен прием аналитического выравнивания таксационных показателей древостоев и статистического анализа материалов массовой таксации. Сгруппированные и выровненные данные обрабатывались с помощью статистических программ CurveExpert и Statistica 6.0 для нахождения уравнений связи между таксационными показателями и возрастом древостоя (регрессионного анализа). Связь таксационных показателей с возрастом уточнялась с помощью параболы.

Для проведения математического моделирования с целью расчета возрастной динамики таксационных показателей использовали один естественный ряд роста и развития древостоя. В качестве критериев принадлежности участка к тому или иному динамическому ряду (к одному типу формирования) принимали сходство условий местопрорастания

<sup>17</sup> Третьяков С. В., Коптев С. В., Наквасина Е. Н., Бахтин А. А., Ильинцев А. С., Богданов А. П., Кекишева Ю. Е. Лесная таксация. Часть 4. Закладка, таксация и описание пробных площадей при проведении научных исследований и подготовке выпускных квалификационных работ: учебное пособие; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. Архангельск: САФУ, 2023: 119.

<sup>18</sup> Сальникова И. С., Воробьева Т. С., Нагимов З. Я., Зубова С.С., Орехова О.Н., Суслов А.В. Таксация леса. Ход роста насаждений:

учебное пособие. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский государственный лесотехнический университет. Екатеринбург: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Уральский государственный лесотехнический университет". 2020: 130 с. – ISBN 978-5-94984-758-9.

(рельеф, морфологию и гидрологические особенности почвы), характеристику живого напочвенного покрова, густоту.

При вычислении запасов использовалась зависимость видовых высот ( $HF$ ) от высоты. По экспериментальным данным установлено, что данный метод показывает приемлемую точность для исследуемых древостоев с помощью видовой высоты для сосновых древостоев притундрового района, вычисленной по формуле

$$HF = 1,33 + 0,4H, \quad (1)$$

где  $HF$  – видовая высота;

$H$  – высота ствола, м.

Указанная зависимость была найдена на основе изучения модельных деревьев из Ненецкого национального округа и Республики Коми.

В литературных источниках также встречается подобная зависимость для сосновых древостоев

в лишайниковом типе леса, например, для Ханты-Мансийского автономного округа, что подтверждает предположение о прямолинейности зависимости видовой высоты от высоты древостоев [18], приведено в уравнении

$$HF = 1,23 + 0,44H. \quad (2)$$

Формула (1) скорректирована для сосновых древостоев экотопа «тайга-тундра» всех регионов европейской части Арктической зоны Российской Федерации [18]

$$HF = 1,28 + 0,41H. \quad (3)$$

## Результаты

Таксационные характеристики пробных площадей, использованных для разработки уравнений связи между таксационными показателями и возрастом древостоя, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Таксационная характеристика пробных площадей в сосняках брусничных на территории Мурманской области

Table 1

Inventory characteristic of study plots of cowberry pine forest in the Murmansk region

№   N	Состав древостоя   Forest stand composition	Средние таксационные показатели   Average taxation indicators			Класс бонитета   Bonitet class	Густота шт./га   density pcs./ha		Полнота   Completeness		Запас, м <sup>3</sup> /га   Stock, m <sup>3</sup> /ha	
		возраст, лет   age, years	высота, м   height, m	диаметр, см   diameter, cm		растущих   growing	сухих   dry	абсолютная м <sup>2</sup> /га   absolute, m <sup>2</sup> /ha	относительная   relative	растущих   growing	сухих   dry
1*62	10С	33	5,6	4,6	V	9560	65	20,8	1,2	92,8	0,2
1*67	10С	38	6	5,4	V	9510	115	27,1	1,6	116,7	0,3
1*72	10С	43	6,3	5,7	V	9570	160	31,4	1,8	147,0	0,8
2*62	10С	35	5,6	5,1	V	8964	84	24,0	1,4	107,8	0,6
2*67	10С	40	6,4	6,1	V	8960	276	31,3	1,8	146,4	1,3
2*72	10С	45	7,0	6,3	V	8960	360	34,4	1,8	173,2	1,2
3*62	10С	34	6,4	7,2	IV	3456	32	19,3	1,1	92,9	0,2
3*67	10С	39	6,8	8,2	V	3796	48	23,8	1,29	114,1	0,6
3*72	10С	44	7,1	8,3	V	3772	72	26,4	1,39	132,1	1,5
7*62	10С	39	6,4	6,4	V	6972	10	22,2	1,24	110,2	0,4
7*67	10С	44	7,1	7,0	V	5804	32	27,7	1,46	138,9	3,4
7*72	10С	49	7,6	7,4	V	5796	28	30,2	1,54	163,4	3,4
1*23	10С	97	15,4	19,8	IV	864	36	26,7	0,9	210	3
2*23	10С	85	15,3	19,4	IV	876	28	25,8	0,8	199	1
3*23	10С	88	13,8	15,7	IV	1672	168	32,2	1,1	231	13
4*23	10С	81	12,6	11,6	V	3615	698	38,2	1,4	257	10

№   N	Состав дре- востоя   Forest stand composition	Средние таксационные показатели   Average taxa- tion indicators			Класс бо- нитета   Bonitet class	Густота шт./га   density pcs./ha		Полнота   Completeness		Запас, м³/га   Stock, m³/ha	
		возраст, лет   age, years	высота, м   height, m	диаметр, см   di- ameter, cm		растущих   growing	сухих   dry	абсолютная м²/га   abso- lute, m²/ha	относи- тельная   relative	растущих growing	сухих   dry
5*23	10С	87	11,6	10,4	V	4815	908	41,2	1,6	271	8
6*23	10С	84	13,1	12,2	V	3356	544	39,1	1,4	274	9
7*23	10С	67	11,3	11,6	IV	3213	94	33,8	1,3	208	1
8*23	10С	66	12,4	12,8	IV	2592	175	33,5	1,3	227	2

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Для сосняка брусничного составлены свои уравнения связи между таксационными показателями и возрастом древостоя. Анализ динамики средних значений таксационных показателей показал существенные различия у изучаемых древостоев, несмотря на одинаковые условия роста и географическую близость расположения пробных площадей.

Зависимость густоты от возраста древостоев IV-V класса бонитета в умеренно густых и перегушенных сосновых древостоях брусничного типа леса отражает формула

$$y = ax^b, \quad (4)$$

где  $y$  – густота, тыс. шт./га;

$a$  – постоянный коэффициент;

$b$  – постоянный показатель степени,

$x$  – возраст, лет.

Значения эмпирических коэффициента  $a$  и показателя степени  $b$  для уравнения (4) приведены в табл. 2. Коэффициенты для перегушенных древостоев (диапазон возраста, 20–80 лет) представлены в строке № 1. Коэффициенты для древостоев умеренной густоты (диапазон возраста, 20–180 лет) представлены в строке № 2.

Таблица 2

Значения эмпирических коэффициента  $a$  и показателя степени  $b$  уравнения (4) густоты древостоя от возраста в перегушенных и умеренной густоты сосняках брусничных

Table 2

The values of the empirical coefficient  $a$  and the exponent  $b$  of the equation (4) of stand density from age in overgrown and moderate density cranberry pine forests

№	Коэффициент $a$   Coefficient $a$	Показатель степени $b$   exponent argument	R <sup>2</sup>	Ошибка   Standard error
	1	1271,937		
2	739,685	-1,51	0,99	0,32

Примечание: 1 – перегушенный древостой (диапазон возраста, 20–80 лет); 2 – древостой умеренной густоты (диапазон возраста, 20–180 лет)

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Динамические ряды таксационных показателей древостоев сгруппированы по одному типу леса (сосняк брусничный) (см. табл. 1) и представлены уравнением:

$$y = a + bx + cx^2 \quad (5)$$

где  $y$  – искомый показатель (высота, м; диаметр, см)

$a, b, c$  – постоянные коэффициенты,

$x$  – средний возраст древостоя, лет.

Значения коэффициентов уравнений зависимости диаметров и высот от возраста приведены в табл. 3.



Значения эмпирических коэффициентов уравнения (5) высоты или диаметра древостоя от возраста в перегушенных и умеренной густоты сосняках брусничных

The values of the empirical coefficients of equation (5) of the height or diameter of the stand depending on age in overgrown and moderate density cranberry pine forests

№	Показатель   Indicator	Значение коэффициента   Coefficient value			R <sup>2</sup>	Ошибка   Standard error
		a	b	c		
IV класс бонитета   IV site-quality class						
1	Н, м   H, m	-3,26412	0,29861	-0,00091	0,97	0,86
2	D, см   D, cm	-4,0712	0,3288	-0,0008	0,91	1,84
3	D, см   D, cm	-1,0966	0,2854	-0,0006	0,89	2,65
V класс бонитета   V site-quality class						
4	Н, м   H, m	-1,57271	0,22577	-0,00068	0,87	0,89
5	D, см   D, cm	-3,34591	0,25036	-0,00053	0,86	1,03
6	D, см   D, cm	-2,90166	0,26635	-0,00067	0,95	0,42

Примечание:

1, 4 – высота в перегушенном и в умеренно густом древостое, соответственно;

2, 5 – диаметр в перегушенном древостое;

3, 6 – диаметр в умеренно густом древостое.

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

### Обсуждение

Разработанные модели роста сосняков брусничных IV и V классов бонитета на северном пределе произрастания в Мурманской области позволят разработать недостающие таблицы хода роста. Для сопоставления полученной модели на рис. 3 приведены возрастные динамики высот по результатам

различных исследований хода роста сосняков V класса бонитета<sup>22</sup> [17].

При помощи *t*-теста и критерия Краскела-Уоллиса выявлены сходства и различия между исследуемыми значениями высот, приведенные на рис. 3. Результаты *t*-теста приведены в табл. 4.

<sup>22</sup> Мошкалев А.Г., Давидов Г.М., Яновский Л.Н., Моисеев В.С., Столяров Д.П., Бурневский Ю.Н. Лесотаксационный справочник по Северо-западу СССР. – Л.: ЛТА. – 1984. – 320 с.

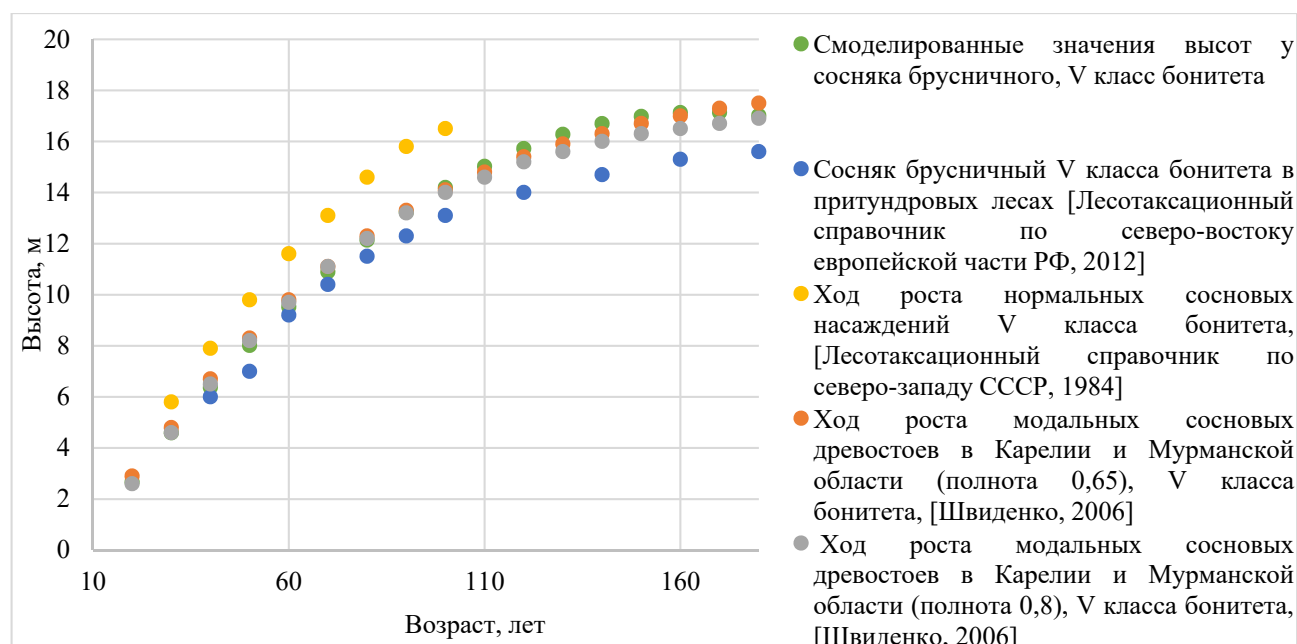


Рисунок 3. Возрастная динамика высот в сосняках

Figure 3. Age dynamics of heights in pine forests

Источник: собственная композиция авторов; источники, указанные в легенде

Source: own composition; sources mentioned in the legend

Таблица 4

Различия средних высот между вариантами таблиц хода роста в сосняках брусничных V класса бонитета

Table 4

Differences in average heights between variants of growth course tables in cranberry pine forests of the V site-quality class

Условное обозначение динамики роста   Symbol for the dynamics of growth	1	2	3	4
2	$\frac{0,2}{0,12}$			
3	$\frac{0,1}{0,05}$	$\frac{0,1}{0,07}$		
4	$\frac{0,7}{0,47}$	$\frac{0,9}{0,61}$	$\frac{0,8}{0,53}$	
5	$\frac{2,1}{1,33}$	$\frac{2,0}{1,24}$	$\frac{2,0}{1,30}$	$\frac{2,8}{1,80}$

Примечание:

Числитель – абсолютная разница в м; знаменатель – достоверность различия,  $t$

1 – Значения высот по результатам исследования.

2 – Ход роста модальных сосновых древостоев в Карелии и Мурманской области (полнота 0,65) [17]

3 – Ход роста модальных сосновых древостоев в Карелии и Мурманской области (полнота 0,8) [17].

4 – Ход роста модальных сосновых древостоев в притундровых лесах по типам леса. Сосняк брусничный.

5 – Ход роста нормальных древостоев.

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Значения достоверности различия меньше стандартного значения, что говорит об отсутствии различий между сравниваемыми группами.

Величина уровня достоверности  $p$  по результатам дисперсионного анализа Краскела-Уоллиса составило  $p=0,485$ , что говорит об отсутствии различий между сравниваемыми группами.

Проведенные исследования позволяют прогнозировать рост и развитие сосняков брусничных, а также дифференцировать их по типам формирования в зависимости от густоты (перегущенные и умеренной густоты). Из табл. 1 выводим, что за период наблюдения значения таксационных показателей изменяются в связи с естественным ростом древостоя. Соответствующие значения абсолютной густоты, диаметра, высоты позволяют оценить хозяйственную ценность древостоя. Средний диаметр совместно с классом товарности позволяет не только оценить сортиментную структуру запаса насаждения в целом, но и определить выход конкретных сортиментов [19].

Кроме того, при проведении полевых работ изучалась динамика сумм площадей сечений, объем отпада, эти данные позволяют оценивать динамику накопления углерода в древесине и отпада в зависимости от возраста и полноты, бонитета [11, 16, 20].

С использованием традиционных методов аналитического выравнивания массовых материалов динамики лесоводственных и лесотаксационных характеристик сосновых древостоев прослежены ряды образования и развития сосновых древостоев в Мурманской области на северной границе естественного распространения, ограниченных водными и водно-болотными пространствами. Разработанные модели предназначены для прогнозирования лесовыращивания и лесопользования, а также для эффективного проведения лесохозяйственных мероприятий.

Выполненные исследования дополняют работы В.Т. Ярмишко и О.В. Игнатъевой (2020) [21], И.Т. Кищенко (2021) [22], Л.В. Зарубиной и Р.С. Хамитова (2021) [23], Е.А. Пинаевской и др. (2020) [24], О.И. Гавриловой и др. (2020) [25] по изучению сосняков на пределе естественного распространения. Постоянные наблюдения на стационарных объектах за историю более 60 лет показывают, что на

формирование модальных сосняков в брусничном типе леса влияет первоначальная густота древостоя.

На изучаемых объектах постоянных наблюдений произрастают избыточно и умеренно густые древостои в одинаковых условиях после сплошной рубки и пожара. Другими словами, в непосредственной близости друг от друга сформировались древостои, значительно отличающиеся по густоте, что дает возможность оценить рост и особенности формирования в различных условиях. Стационарные наблюдения за ростом в сосновых древостоях наглядно показывают, что необходимо проводить комплекс лесохозяйственных мероприятий, включающий проведение рубок ухода в указанных древостоях, что позволит получать ценные сортименты и повысить природоохранные функции этих древостоев. Так как по результатам исследования А.А. Вайс и др. [26] для высокополнотных сосновых древостоев района исследования качество условий местопроизрастания не оказывает существенного влияния на санитарное состояние насаждений. Причинами снижения устойчивости сосняков авторы считают возраст, полноту, фитопатологическое состояние насаждений и климатические изменения, что подтверждает предположение о необходимости регулирования густоты.

Данные о динамике отпада по запасу позволят разработать рекомендации по хозяйственному использованию данных древостоев и оценке биологической продуктивности насаждений. Информация об особенностях динамики роста в зависимости от густоты сосняков на северном пределе произрастания способствует повышению качества планирования рубок. Совершенствование системы лесохозяйственных мероприятий в сосняках должно вестись в зависимости продуктивности древостоя и лесотипологической характеристики по исследованиям Осипенко А.Е., Залесова С.В., 2023 [27].

### Заключение

Стационарные наблюдения за сосняками брусничными в Мурманской области позволят отслеживать динамику таксационных показателей, поэтому их актуальные характеристики могут отражать динамику роста в существующих условиях изменения климата.

Результаты моделирования хода роста по результатам долговременных наблюдений за производными сосняками брусничного типа леса разной густоты в Мурманской области показали особенности формирования модальных сосняков различной густоты. Показатель густоты в зависимости от возраста достаточно точно описывается степенной функцией ( $R^2 = 0,96-0,99$ ).

Таксационные показатели средних высоты и диаметра (1,3 м) древостоя сосняка брусничного в зависимости от возраста достаточно точно аппроксимируются параболой, наибольшая точность достигается при прогнозировании высоты ( $R^2 = 0,97$ ) древостоя как в загущенных, так и в древостоях умеренной густоты. Получены значения эмпирических

коэффициентов уравнения высоты или диаметра древостоя от возраста в перегущенных и умеренной густоты сосняках брусничных, характеризующих высокую тесноту связи ( $R^2=0,86-0,97$ ) связь между признаками статистически значима ( $p < 0,05$ ).

Моделирование роста производных сосняков брусничного типа леса разной густоты в Мурманской области будет способствовать составлению таблицы хода роста сосняка брусничного на северном пределе распространения в целях получения достоверной информации о количественных и качественных характеристиках защитных лесов и особо защитных участков лесов.

### Список литературы

1. Биоразнообразие и климатрегулирующие функции лесов: актуальные вопросы и перспективы исследований / Н. В. Лукина, А. П. Гераскина, А. В. Горнов, Н. Е. Шевченко, А. В. Куприн, Т. И. Чернов, С. И. Чумаченко, В. Н. Шанин, А. И. Кузнецова, Д. Н. Тебенькова, М. В. Горнова // Вопросы лесной науки. 2020; 4: 1-90. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44598661>.
2. Им С. Т., Харук В. И., Ли В. Г. Миграция северной границы вечнозелёных хвойных древостоев в Сибири в XXI столетии. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020; 17(1): 176-187. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42535197>.
3. González-Díaz, P., Gazol, A., Valbuena-Carabaña, M., Sangüesa-Barreda, G., Moreno-Urbano, A., Zavala, M. A., Camarero, J. J. Remaking a stand: Links between genetic diversity and tree growth in expanding Mountain pine populations. *Forest Ecology and Management*. 2020; 472: 118244. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118244>.
4. Méndez-Cea B., García-García I., Gazol A., Camarero J. J., de Andrés E. G., Colangelo M., Linares J. C. Weak genetic differentiation but strong climate-induced selective pressure toward the rear edge of mountain pine in north-eastern Spain. *Science of the Total Environment*. 2023; 858: 159778. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159778>.
5. Housset J. M., Tóth E. G., Girardin M. P., Tremblay F., Motta R., Bergeron Y., Carcaillet C. Tree-rings, genetics and the environment: Complex interactions at the rear edge of species distribution range. *Dendrochronologia*. 2021; 69: 125863. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125863>.
6. Shah, S., Yu, J., Liu, Q., Shi, J., Ahmad, A., Khan, D., & Mannan, A. Climate growth response of *Pinus sibirica* (Siberian pine) in the Altai Mountains, northwestern China. *Pakistan Journal of Botany*. 2020; 52 (2): 593-600. DOI: [http://doi.org/10.30848/PJB2020-2\(16\)](http://doi.org/10.30848/PJB2020-2(16)).
7. Лопатин, Е. Методика выявления лесных участков, наиболее перспективных для ведения интенсивного устойчивого лесного хозяйства. *Устойчивое лесопользование*. 2016; 2(46): 16-24. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34958106>.
8. Особенности роста *Pinus sylvestris* L. в местах, ограниченных белым морем, на территории Архангельской области / А. В. Давыдов, А. П. Богданов, С. В. Третьяков, И. В. Цветков, А. А. Карабан, А. А. Парамонов // Успехи современного естествознания. 2023; 8: 23-29. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54404415>.

9. Гаврилова, О. И., Колганов Е. С., Пак К. А. Оценка успешности самовозобновления сосны на гари. Лесотехнический журнал. 2020; Т. 10. № 4 (40): 142–149. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.4/11. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44596669>.
10. Кутявин И. Н., Манов А. В., Дымов А. А. Динамика структуры постпирогенных древостоев сосняков брусничных Северного Приуралья (Республика Коми). Экобиотех. 2020; 3(4): 627-633. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44474058>.
11. Кутявин И. Н., Манов А. В. Биологическая продуктивность естественно развивающегося и нарушенного ветровалом сосняка лишайникового (Республика Коми). Сибирский лесной журнал. 2019; 2: 53-63. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38241764>.
12. Робакидзе Е. А., Бобкова К. С. Мониторинг состояния *Pinus sylvestris* (Pinaceae) в сосняках лишайниковых при загрязнении выбросами сыктывкарского лесопромышленного комплекса (Республика Коми). Растительные ресурсы. 2022; 58 (4): 417-430. DOI: <http://doi.org/10.31857/S0033994622040094>. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49937841>.
13. Манов А. В., Кутявин И. Н. Структура древостоя в старовозрастном постпирогенном сосняке бруснично-лишайниковом в бассейне реки Печоры. Лесоведение. 2018; 6: 434-443. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36311765>.
14. Тюкавина О. Н., Феклистов А. П. Пожароустойчивость сосновых древостоев на севере Архангельской области. Лесоведение. 2019; 6: 501-511. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41151920>.
15. Залесова Е. С., Белов Л. А., Залесов С. В., Тимербулатов Ф. Т., Чермных А. И. Влияние типа леса и полноты древостоев на обеспеченность подростом спелых и перестойных сосняков подзоны северной тайги. Международный научно-исследовательский журнал. 2019; 11-2(89): 37-41. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41369156>.
16. Кутявин И. Н., Бобкова К. С. Биологическая продуктивность сосновых фитоценозов северного Приуралья (республика Коми). Лесоведение. 2017; 1: 3-16. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28147870>.
17. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии: нормативно-справочные материалы / А. З. Швиденко, Д. Г. Щепаченко, С. Нильссон, Ю. И. Булуй ; М-во природных ресурсов Российской Федерации, Федеральное агентство лесного хоз-ва, Международный ин-т прикладного системного анализа. Москва: 2006. 803 с. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19495378>.
18. Богданов А. П., Третьяков С. В., Давыдов А. В. Унифицированные таблицы объемов стволов для насаждений сосны обыкновенной на северном пределе их распространения в Архангельской и Мурманской областях, Республиках Карелия и Коми. Материалы VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Леса России: политика, промышленность, наука, образование». 2023; 177-179. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54723470>.
19. Михайлова, М. И., Чернышов М. П. Особенности строения географических лесных культур сосны обыкновенной по диаметру. Лесотехнический журнал. 2021; Т. 11. № 1 (41): 46–55. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44938463>. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.1/4.
20. Ануев Е. А., Вайс А. А. Оценка бюджета углерода отпада ствольной древесины сосновых насаждений Сибири по таблицам хода роста. Хвойные бореальной зоны. 2019; 37(1): 17-24. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37078269>.
21. Ярмишко В. Т., Игнатьева О. В. Скорость роста и структура фитомассы *Pinus sylvestris* (Pinaceae) в средневозрастных сосняках Мурманской области. Растительные ресурсы. 2020; 56 (4): 314-325. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44220254>.
22. Кищенко, И. Т. Сезонный рост сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в таежной зоне Карелии на разных этапах онтогенеза // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2021; 25 (2): 19-24. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45662491>.

23. Зарубина Л. В., Хамитов Р. С. Сезонный рост сосны обыкновенной на заболоченных почвах Севера // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2021; 3 (381): 86-100. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45830008>.
24. Пинаевская Е. А., Тарханов С. Н., Пахов А. С. Особенности роста разных форм сосны обыкновенной в кустарничково-сфагновом типе леса устья реки Онега. Социально-экологические технологии. 2020; 10 (2): 151-169. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44258591>.
25. Гаврилова О. И., Морозова И. В., Ольхин Ю. В. Динамика роста и оценка состояния культур сосны обыкновенной навейниково-луговиковых вырубках методами дистанционного зондирования. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2020; 1 (373): 63-74. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42446371>.
26. Оценка состояния и продуктивности высокоплотных сосновых насаждений подтаежно-лесостепного района Средней Сибири / А. А. Вайс, П. В. Михайлов, А. И. Мельник, С. А. Чанчикова, О. А. Герасимова, Е. А. Ануев, А. Г. Неповинных // Лесотехнический журнал. 2022. – Т. 12. – № 3 (47). – С. 26–41. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.3/3>.
27. Осипенко А. Е., Залесов С. В. Разновозрастность сосновых древостоев как фактор гармонизации системы лесохозяйственных мероприятий в ленточных борах Алтайского края // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 1 (49). – С. 129–145. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/9>. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53814694>.

### References

1. Lukina N.V., Gerasikina A.P., Gornov A.V., Shevchenko N.E., Kuprin A.V., Chernov T.I., Chumachenko S.I., Shani V.N., Kuznetsova A.I., Tebenkova D.N., Gornova M.V. Bioraznoobrazie i klimatoregulirujushhie funkicii lesov: aktual'nye voprosy i perspektivy issledovaniy [Biodiversity and climate regulating functions of forests: current issues and prospects for research]. Voprosy lesnoy nauki [Questions of forest science]. 2020; 3(4): pp. 1-90. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44598661>.
2. Im S.T., Kharuk V.I., Lee V.G. Migracija severnoj granicy vechnozelnjonyh hvojnnyh drevostoev v Sibiri v XXI stoletii [Migration of the northern evergreen needleleaf timberline in Siberia in the 21st century]. Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern problems of remote sensing of the Earth from space]. 2020; 17(1): pp. 176-187. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42535197>.
3. González-Díaz P., Gazol A., Valbuena-Carabaña M., Sangüesa-Barreda G., Moreno-Urbano A., Zavala M. A., Camarero J. J. Remaking a stand: Links between genetic diversity and tree growth in expanding Mountain pine populations. Forest Ecology and Management, (2020): 472, 118244. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118244.
4. Méndez-Cea B., García-García I., Gazol A., Camarero J. J., de Andrés E. G., Colangelo M., Linares J. C. (2023). Weak genetic differentiation but strong climate-induced selective pressure toward the rear edge of mountain pine in north-eastern Spain. Science of the Total Environment, 858, 159778. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159778.
5. Housset J. M., Tóth E. G., Girardin M. P., Tremblay F., Motta R., Bergeron Y., Carcaillet C. Tree-rings, genetics and the environment: Complex interactions at the rear edge of species distribution range. Dendrochronologia, (2021): 69, 125863. DOI: 10.1016/j.dendro.2021.125863.
6. Shah S., Yu J., Liu Q., Shi J., Ahmad A., Khan D., Mannan A. Climate growth response of pinus sibirica (Siberian pine) in the Altai Mountains, northwestern China. Pakistan Journal of Botany. 2020; 52 (2): pp. 593-600. DOI: 10.30848/PJB2020-2(16).
7. Lopatin E. Metodika vyyavleniya lesnykh uchastkov, naiboleye perspektivnykh dlya vedeniya intensivnogo ustoychivogo lesnogo khozyaystva [Methodology for identifying forest areas that are most promising for intensive sustainable forestry]. Ustoychivoye lesopol'zovaniye [Sustainable forest management]. 2016; 2(46): pp.16-24. (In Russ.). – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34958106>
8. Davydov A.V., Bogdanov A.P., Tret'yakov S.V., Tsvetkov I.V., Karaban A.A., Paramonov A.A. Osobennosti rosta Pinus sylvestris L. V mestakh, ogranichennykh belym morem, na territorii Arkhangel'skoy oblasti [Growth features of pinus sylvestris L. In places bounded by the White sea On the territory of the Arkhangelsk region]. Uspekhi

sovremennogo yestestvoznaniya [Advances in current natural sciences]. 2023; (8): pp. 23-29. (In Russ.). – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54404415>.

9. Gavrilova O.I., Kolganov E.S., Pak K.A. (2020) Evaluation of success of pine self-renewal forests on burnt-out areas. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], Vol. 10, No. 4 (40), pp. 142-149 (in Russian). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.4/11. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44596669>.

10. Kutyavin I. N., Manov A. V. V., Dymov A. A. Dinamika struktury postpirogennyh drevostoev sosnjakov brusnichnyh Severnogo Priural'ja (Respublika Komi) [The structure dynamics of post-pyrogenic cowberry pine stands of the Northern Cis-ural (Komi Republic)]. *Jekobiotech* [Ecobiotech]; 2020. 3(4): pp. 627-633. (In Russ.). – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44474058>.

11. Kutyavin I. N., Manov A. V. Biologicheskaja produktivnost' estestvenno razvivajushhegosja i narushennogo vetrovalom sosnjaka lishajnikovogo (Respublika Komi) [Biological productivity of the naturally developing and disturbed by windfall lichen pine forest (Komi Republic)]. *Sibirskij lesnoj zhurnal* [Siberian Forestry Journal]. 2019; 2: pp. 53-63. (In Russ.). – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38241764>.

12. Robakidze, E.A., Bobkova K.S. Monitoring sostojanija Pinus sylvestris (Pinaceae) v sosnjakah lishajnikovyh pri zagryznenii vybrosami syktyvkarskogo lesopromyshlennogo kompleksa (Respublika Komi). [Monitoring the state of scots pine in lichen pine forests affected by emissions from Mondi Syktyvkar timber industry complex (Komi Republic)]. *Rastitel'nye resursy* [Plant Resources]. 2022; 58 (4): pp. 417-430. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49937841>.

13. Manov A. V. V., Kutyavin I. N. Struktura drevostoja v starovozrastnom postpirogennom sosnjake brusnichno-lishajnikovom v bassejne reki Pechory [Structure of a stand in an old-growth post-pyrogenic lingonberry-lichen pine forest in the Pechora River basin]. *Lesovedenie*. [Russian Journal of Forest Science]. 2018; 6: pp. 434-443. (In Russ.). – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36311765>.

14. Tyukavina O. N., Feklistov P. A. Pozharoustoychivost' sosnovykh drevostoyev na severe Arkhangel'skoj oblasti [Fire Resilience of Pine Stands in the North of Arkhangelsk Oblast]. *Lesovedeniye* [Forestry] 2019. 6. pp. 501-511. (In Russ.). – URL: <http://lesovedenie.ru/index.php/forestry/article/view/1211>

15. Zalesova, E. S., Belov, L. A., Zalesov, S. V., Timerbulatov, F. T., Chermnykh, A. I. Vlijanie tipa lesa i polnoty drevostoev na obespechennost' podrostom spelyh i perestojnyh sosnjakov podzony severnoj tajgi. [Influence of forest type and normality on security of matter of ripe and perennial pine winds of north taiga subzone]. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal* [International Research Journal]. 2019; 11-2(89): pp. 37-41. (In Russ.). – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41369156>.

16. Kutyavin, I. N., Bobkova, K. S. Biologicheskaja produktivnost' sosnovykh fitocenzozov severnogo Priural'ja (respublika Komi). [Bioproductivity of pine phytocoenoses in the Northern Cisurals Region (the Republic of Komi)]. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science]. 2017. (1): 3(16). – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28147870>. (In Russ.)

17. Shvidenko, A.Z., Szczepaschenko, D. G., Nielson, S., Buluj, Y. I. (2008). Tablicy i modeli hoda rosta i produktivnosti nasazhdenij osnovnyh lesoobrazujushhih porod Severnoj Evrazii: normativno-spravochnye materialy [Tables and models of growth and productivity of forests of major forest forming species of Northern Eurasia standard and reference materials] (In Russ.). – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19495378>.

18. Bogdanov A.P., Tretyakov S.V., Yaroslavtsev S.V., Davydov A.V. Unificirovannye tablicy ob'emov stvolov dlja nasazhdenij sosny obyknovЕННОj na severnom predele ih rasprostraneniya v Arhangel'skoj i Murmanskoy oblastjah, Respublikah Karelija i Komi [Unified tables of trunk volumes for stands of common pine at the northern limit of their distribution in the Arkhangelsk and Murmansk Regions, Republics of Karelia and Komi]. *Materialy VIII Vserossijskaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Les Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie»* [Proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Technical Conference "Forests of Russia: policy, industry, science, education] 2023: pp. 177-179. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54723470>.

19. Mikhailova M.I., Chernyshov M.P. (2021) Structural features of provenance trail plantations of pine in terms of diameter. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 11, No. 1 (41), pp. 46-55 (in Russian). – URL <https://elibrary.ru/item.asp?id=44938463>. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.1/4.
20. Anuev, E.A., Weiss, A.A. Ocenka bjudzhetnogo ugleroda otpada stvolovoj drevesiny sosnovykh nasazhdenij Sibiri po tablicam hoda rosta. [Estimation of the carbon budget of stem wood falling of pine plantations of Siberia by growth tables]. *Hvojnnye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal zone], 2019; 37(1): pp. 17-24. (In Russ.). –URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37078269>.
21. Jarmishko V.T., Ignat'eva O.V. Skorost' rosta i struktura fitomassy *Pinus sylvestris* (Pinaceae) v srednevozrastnykh sosnjakah Murmanskoj oblasti. [Growth rate and phytomass structure of *pinus sylvestris* (pinaceae) in the middle-aged scots pine forests of the Murmansk region] *Rastitel'nye resursy*. 2020; T. 56, № 4. pp. 314-325. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44220254>.
22. Kishhenko I.T. Sezonnij rost sosny obyknovnoj (*Pinus sylvestris* L.) v taezhnoj zone Karelii na raznykh etapah ontogeneza [Scots pine (*pinus sylvestris* L.) seasonal growth at different stages of ontogenesis in taiga zone (Karelia)]. *Lesnoj vestnik. Forestry Bulletin*. 2021; T. 25, № 2. pp. 19-24. (In Russ.). – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45662491>
23. Zarubina L.V., Hamitov R.S. Sezonnij rost sosny obyknovnoj na zabolochennykh pochvah Severa [Seasonal growth of scots pine under the conditions of water-logged soils of the north]. *Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Lesnoj zhurnal*. 2021; № 3(381). pp. 86-100. (In Russ.). – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45830008>.
24. Pinaevskaja E.A., Tarhanov S. N., Pahov A.S. Osobennosti rosta raznykh form sosny obyknovnoj v kustarnichkovo-sfagnovom tipe lesa ust'ja reki Onega [Growth features of different forms of scots pine in the shrub-sphagnum forest type estuary of the Onega river]. *Social'no-jekologicheskie tehnologii*. 2020; T. 10, № 2. pp.151-169. (In Russ.). – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44258591>.
25. Gavrilova O. I., Morozova I. V., Ol'hin Ju. V. Dinamika rosta i ocenka sostojanija kul'tur sosny obyknovnoj na vejnikovo-lugovikovykh vyrubkah metodami distancionnogo zondirovanija [Growth Dynamics and Status Assessment of Scots Pine Crops on Reedgrass Meadow Cuts by Remote Sensing Techniques]. *Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Lesnoj zhurnal*. 2020; № 1 (373). pp. 63-74. (In Russ) – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42446371>.
26. Vais A. A., Mikhailov P. V., Melnik A. I., Chanchikova S. A., Gerasimova O. A., Anuev E. A., Nepovinnykh A. G. (2022) Assessment of the condition and productivity of high pine plantations in the subtaiga forest-steppe region of Central Siberia. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 12, No. 3 (47), pp. 26–41 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.3/3>.
27. Osipenko A. E., Zalesov S. V. (2023). Age differences of pine stands as a factor of harmonization of the system of forest management activities in ribbon forests of the Altai Krai. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 1 (49), pp. 129-145 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/9> – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53814694>.

### Сведения об авторах

*Третьяков Сергей Васильевич* – д-р с.-х. наук, главный научный сотрудник ФБУ «СевНИИЛХ», ул. Никитова, 13. г. Архангельск, 163062, Российская Федерация; профессор кафедры лесоводства и лесоустройства, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», набережная Сев. Двины, 17, г. Архангельск, 163002, Российская Федерация; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5982-3114>; e-mail: [s.v.tretyakov@narfu.ru](mailto:s.v.tretyakov@narfu.ru).

✉ *Богданов Александр Петрович* – канд. с.-х. наук, старший научный сотрудник ФБУ «СевНИИЛХ», ул. Никитова, 13. г. Архангельск, 163062, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1655-7212>; e-mail: [aleksandr\\_bogd@mail.ru](mailto:aleksandr_bogd@mail.ru).

*Цветков Илья Васильевич* – канд. с.-х. наук, старший научный сотрудник ФБУ «СевНИИЛХ», ул. Никитова, 13. г. Архангельск, Российская Федерация; 163062, доцент кафедры лесоводства и лесоустройства,



ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», набережная Северной Двины, 17, г. Архангельск, 163002, Российская Федерация; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1559-32540>; e-mail: [i.tsvetkov@narfu.ru](mailto:i.tsvetkov@narfu.ru).

*Давыдов Александр Владимирович* – лаборант-исследователь, ФБУ «СевНИИЛХ», ул. Никитова, 13, г. Архангельск, 163062; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4328-7040>; e-mail: [davydov.a@edu.narfu.ru](mailto:davydov.a@edu.narfu.ru).

*Карaban Алексей Александрович* – лаборант-исследователь, ФБУ «СевНИИЛХ», ул. Никитова, 13, г. Архангельск, Российская Федерация; 163062; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2934-0303>; e-mail: [karaban.a@edu.narfu.ru](mailto:karaban.a@edu.narfu.ru).

### Information about the authors

*Sergey V. Tretyakov* – Dr. Sci. (Agriculture), Chief Scientific Officer of the Northern Research Institute of Forestry, Nikitova str., 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; Professor of the Department of Forestry and Forest Management, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, embankment of the Northern Dvina, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5982-3114>; e-mail: [s.v.tretyakov@narfu.ru](mailto:s.v.tretyakov@narfu.ru).

✉ *Alexander P. Bogdanov* – Cand. Sci. (Agriculture), Senior researcher of the Northern Research Institute of Forestry, Nikitova str., 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1655-7212>; e-mail: [aleksandr\\_bogd@mail.ru](mailto:aleksandr_bogd@mail.ru).

*Ilya V. Svetkov* – Cand. Sci. (Agriculture), Senior researcher of the Northern Research Institute of Forestry, Nikitova str., 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; Associate Professor of the Department of Forestry and Forest Management, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, embankment of the Northern Dvina, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1559-32540>; e-mail: [i.tsvetkov@narfu.ru](mailto:i.tsvetkov@narfu.ru).

*Alexander V. Davydov* – Laboratory-researcher of the Northern Research Institute of Forestry, Nikitova str., 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4328-7040>; e-mail: [davydov.a@edu.narfu.ru](mailto:davydov.a@edu.narfu.ru).

*Aleksey A. Karaban* – Laboratory-researcher of the Northern Research Institute of Forestry, Nikitova str., 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2934-0303>; e-mail: [karaban.a@edu.narfu.ru](mailto:karaban.a@edu.narfu.ru).

✉ – Для контактов/Corresponding author

Научный обзор

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/4>

УДК 630\*434



## К вопросу восстановления поврежденных пожарами лесных площадей

**Роман К. Калинин**, komers.for@gmail.com e-mail <https://orcid.org/0000-0001-5863-0564>

**Михаил В. Ивашнев** , ivashnev.mv@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0001-7780-9922>

**Алексей С. Васильев**, alvas@petsu.ru <https://orcid.org/0000-0003-2349-5600>

**Юрий В. Суханов**, yurii\_ptz@bk.ru <https://orcid.org/0000-0002-1517-5538>

*ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», просп. Ленина, 33, г. Петрозаводск, Республика Карелия, 185910, Российская Федерация*

В статье рассмотрены вопросы восстановления поврежденных пожарами лесных площадей. Лесные пожары наносят не только экологический, но и материальный ущерб. Если экологический ущерб, наносимый попаданием в атмосферу продуктов горения, компенсировать практически невозможно, то восстановить лесные ресурсы – посильная задача. В настоящее время для лесовосстановления на лесных гарях и горельниках используются те же технологии, что и при проведении лесовосстановительных работ на лесных площадях после вырубki леса. Однако их эффективность с учетом природно-производственных условий оказывается зачастую не на самом высоком уровне. Обострение проблемы лесных пожаров вызывает необходимость применения высокоэффективных отечественных способов и технических средств для лесовосстановления после пожаров. Целью данного исследования является определение уровня технического развития отечественных современных способов и технических средств восстановления поврежденных пожарами лесных площадей. В ходе проведенного патентно-информационного поиска и анализа научно-технической литературы были изучены современные способы и технические средства для восстановления лесных насаждений на поврежденных пожарами площадях, проведен анализ собранной информации. Отмечена эффективность применения мульчерного рабочего органа для предварительной подготовки лесной площади, нарушенной пожарами.

**Ключевые слова:** гарь, горельник, древесина, лесная почва, лесной пожар, лесовосстановление, мульчерный рабочий орган, щена

**Финансирование:** данное исследование не получало внешнего финансирования.


**Благодарности:** авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** К вопросу восстановления поврежденных пожарами лесных площадей / Р. К. Калинин, М. В. Ивашнев, А. С. Васильев, Ю. В. Суханов // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 1 (53). – С. 54–80. – Библиогр.: с. 72–79 (59 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/4>.

*Поступила 15.11.2023. Пересмотрена 21.01.2024. Принята 12.02.2024. Опубликовано онлайн 20.03.2024*

## On the issue of restoration of forest areas damaged by fires

**Roman K. Kalinin**, komers.for@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0001-5863-0564>

**Mikhail V. Ivashnev** , ivashnev.mv@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-7780-9922>

**Alexey S. Vasiliev**, alvas@petsu.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2349-5600>

**Yuri V. Sukhanov**, yurii\_ptz@bk.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-1517-5538>

*Petrozavodsk State University, Lenin ave., 33, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation*

### Abstract

The article discusses the issues of restoration of forest areas damaged by fires. Forest fires cause not only environmental, but also material damage. If it is almost impossible to compensate for the environmental damage caused by the ingress of combustion products into the atmosphere, then restoring forest resources is a feasible task. Currently, the same technologies are used for reforestation in fire-damaged forest and burnt areas as for reforestation in forest sites after deforestation. However, their efficiency, taking into account natural and industrial conditions, is often not at the highest level. The aggravation of the problem of forest fires necessitates the use of highly effective domestic methods and technical means for reforestation after fires. The purpose of this study is to determine the level of technical development of domestic modern methods and technical means of restoring forest areas damaged by fires. In the course of the patent information search and analysis of scientific and technical literature, modern methods and technical means for restoring forest plantations in areas damaged by fires were studied, and the collected information was analyzed. The effectiveness of the use of a mulch working body for the preliminary preparation of a forest area disturbed by fires is noted.

**Keywords:** *burnt area, fire-damaged forest, wood, forest soil, forest fire, reforestation, mulcher working body, wood chips*

**Funding:** this study did not receive external funding.

**Acknowledgments:** authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Kalinin R. K., Ivashnev M. V., Vasiliev A. S., Sukhanov Y. V. (2024). On the issue of restoration of forest areas damaged by fires. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 1 (53), pp. 54-80 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/4>.

**Received** 15.11.2023. **Revised** 21.01.2024. **Accepted** 12.02.2024. **Published online** 20.03.2024.

### Введение

Лесные пожары имеют ряд отрицательных последствий для природы, среди которых наряду с загрязнением атмосферы продуктами горения следует отметить уничтожение органического слоя почвы, изменение видового состава биоценозов и др.

Леса покрывают 31 % территории суши, но неравномерно распределены по всему земному шару. Общая площадь лесов составляет

4,06 млрд га. Более половины мировых лесов находится всего в пяти странах (рис. 1) [1].



Рисунок 1. Диаграмма распределения площади лесов по странам

Figure 1. Diagram of the distribution of forest area by country

Источник: Salimova G., Ableeva A., Lubova T., Sharafutdinov A., Araslanbaev I. Multidimensional modeling of the economy of forest management and reforestation. *Ecological Modelling*. 2022; Vol. 472. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.110098>.

Source: Salimova G., Ableeva A., Lubova T., Sharafutdinov A., Araslanbaev I. Multidimensional modeling of the economy of forest management and reforestation. *Ecological Modelling*. 2022; Vol. 472. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.110098>.

Проблема гибели леса в результате пожаров относится к глобальным проблемам человечества. Оценка последствий лесных пожаров проводится в основном по простому показателю – площади пожара [2].

А.Ю. Мануковский и Ю.А. Макарова указали, что «... ежегодно в мире горит 10-15 миллионов гектаров леса [3]», затраты на ликвидацию лесных пожаров и их последствий представлены на рис. 2.

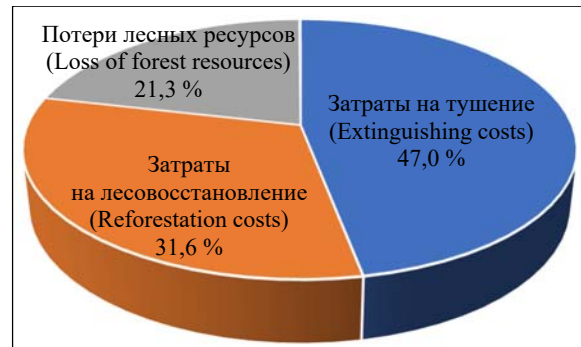


Рисунок 2. Затраты на ликвидацию лесных пожаров и их последствий

Figure 2. Costs for the elimination of forest fires and their consequences

Источник: Мануковский А.Ю., Макарова Ю.А. Исследование восстановления лесных площадей, пострадавших из-за пожаров. *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. 2018; 6 (3): 87-91. Режим доступа: <https://elibrary.ru/ypclxk>.

Source: Manukovsky A.Yu., Makarova Yu.A. Research on the restoration of forest areas affected by fires. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*. 2018; 6 (3): 87-91. URL: <https://elibrary.ru/ypclxk>.

Стоимость поврежденных зданий и сооружений составляет около 0,1 % и на рис. 2 не указана. Россия имеет высокий уровень горимости лесов в бореальной зоне. Интенсивность пожара является важнейшим показателем, определяющим количество сгоревших растительных горючих материалов, и определяет степень разрушения биогеоценоза и характер послепожарного восстановления [4, 5]. Общее проективное покрытие живого напочвенного покрова на гарях уменьшается, а количество сорных видов растительности увеличивается [6, 7].

В работе [8] отмечено, что повреждение нижней части деревьев низовым пожаром ведёт к заселению их вредителями. Кроме потери деловой древесины, нанесения экологического ущерба окружающей среде, лесные пожары оставляют после себя значительные опустошенные площади. Процесс восстановления лесов после пожаров занимает длительный период, который длится десятилетиями [9].

Вследствие низовых пожаров полностью уничтожаются напочвенный покров и древостой. Живой напочвенный покров восстанавливается только через 4-5 лет после пожара, несмотря на увеличение процента освещенности территории. Естественное возобновление древесной растительности после пожаров изменяет ее видовой состав [10]. Только спустя 15 лет после пожара в сосновом лесу начинается формирование лесной экосистемы [11, 12].

В работах [13, 14] рассмотрены управляющие факторы интенсификации лесовосстановления в зависимости от последствий после лесных пожаров. Искусственное лесовосстановление по уровню затрат в разы превосходит естественное, поэтому оно проводится при невозможности обеспечить естественное лесовосстановление [15].

В работах зарубежных ученых отмечено, что процесс восстановления лесных территорий, поврежденных пожарами, естественным образом протекает очень медленно и для ускорения процесса лесовосстановления требуется проведение специальных работ по искусственному содействию [16, 17]. После низовых пожаров отмечена удовлетворительная приживаемость семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) при искусственном лесовосстановлении [18, 19]. При этом площади искусственно засаживаются, когда естественные процессы не позволяют достичь желаемой численности, видового состава, темпов роста или структуры леса [20].

В результате лесных пожаров ущерб, наносимый окружающей среде, сохраняется длительное время. Даже через 10 лет после пожара, растительный покров вокруг живых и отмерших деревьев различается [21].

Поэтому одной из нерешенных задач является повышение эффективности лесовосстановления на площадях, поврежденных пожарами. При естественном лесовосстановлении возникает множество сложностей, например, отдельные виды растений препятствуют развитию ценных лесообразующих пород; в результате воздействия огня нарушаются нормальные условия произрастания древостоев. Интенсификация лесовосстановления может быть достигнута не только за счет содействия естественному лесовосстановлению путем высадки искусственно выращенного посадочного материала,

но за счет проведения работ по созданию благоприятных условий для возобновления и роста.

Процесс выращивания саженцев и семян для искусственного лесовосстановления, а также процесс их высадки достаточно хорошо отработаны [22]. Совсем другая картина складывается в отношении технологических процессов подготовки поврежденного пожаром почвенного покрова, подготовки субстрата и создания благоприятных условий для скорейшего роста деревьев целевых пород на лесных гарях и горельниках.

Лесовосстановление на гарях и горельниках представляет собой достаточно сложную проблему для лесного хозяйства и зависит от множества факторов [23-25]. Выбор способа содействия естественному возобновлению должен основываться на учете местных особенностей лесов и условий их произрастания.

Например, предварительная обработка саженцев ели корейской (*Picea koraiensis*) при помощи крезацина и эпин-экстра показала эффективность применения данного способа для ускоренного выращивания посадочного материала [26].

В работах зарубежных авторов [27, 28] отмечено, что предварительная подготовка почвы в виде поверхностного рыхления дает более высокую приживаемость и дальнейшее развитие саженцев. Для сухих почв или для почв, имеющих уплотненный поверхностный слой, рекомендовано проводить глубокое рыхление перед восстановлением, что ограничит рост заглушающих растений.

Также отмечена эффективность периодического прореживания лесов и удаления древесно-кустарниковой растительности, заглушающей послепожарное восстановление хвойных пород древесины [29-31].

Согласно ГОСТ Р 59058-2020 к гари относится лесная площадь с древостоем, погибшим в результате пожара, а к горельнику – лесная площадь с древостоем, частично погибшим в результате пожара.

Выделяют две группы поврежденных пожарами древостоев:

– товарные с запасом древесины более 50 м<sup>3</sup>/га и средним диаметром более 16 см;

– нетоварные, занятые мелколесьем и молодняками с незначительным запасом древесины и средним диаметром менее 16 см.

На участках с товарным древостоем, представляющим хозяйственную ценность, проводится заготовка древесины. Разработка участков с нетоварным древостоем проводится путем срезки кустарника и мелколесья.

Таким образом, первоначально на основании обследования гарей и горельников определяют требуемый вид работ для освобождения территории от поврежденных пожарами древостоев в зависимости

от типа пожара, повреждения ярусов растительности, возможности использования уцелевшей древесины [32].

Согласно рекомендациям [33] для подготовки площадей, пройденных лесными пожарами, обработку почвы перед последующим лесовосстановлением можно разделить по типам увлажнения почвы:

- обработка почвы в виде борозд;
- обработка почвы в виде гряд или микроповышений;
- обработка почвы подготовкой канав с образованием двух пластов.

Для данных целей рекомендована техника, представленная в табл. 1 и табл. 2

Таблица 1

Оборудование для подготовки площадей, пройденных лесными пожарами

Table 1

Equipment for the preparation of areas covered by forest fires

Показатели   Indicators	Подборщик сучьев   The bough picker	Корчевальные машины   Rooting machines		
	ПС-2,4	Д-513А	КМ-1	МП-8
Базовый трактор	ТЛТ-100	Т-130	ТЛТ-100	Т-130БГ
Мощность базового трактора, кВт (л.с.)	88,2 (120)	160 (118)	88,2 (120)	160 (118)
Ширина захвата, м	2,4	1,38	0,71	1,28
Производительность, га/ч	0,34	-	-	-
Производительность при корчевании пней, шт./ч	-	30	32	-
Диаметр корчующих пней, см	-	до 40	до 60	до 45

Источник: по данным [33] | Source: according to [33]

Таблица 2

Оборудование для обработки почвы после лесных пожаров, перед лесовосстановлением

Table 2

Equipment for tillage, after forest fires, before reforestation

Показатели   Indicators	Лесные плуги   Forest plows					
	ПКЛ-70	ПЛБ-07	ПЛП-135	ПЛ-2-50	ПЛМ-1,5	ПКЛН-500А
Базовый трактор	ТЛТ-100	МТЗ-82	Т-130	ТЛТ-100	ТЛТ-100	Т-130БГ
Мощность базового трактора, кВт (л.с.)	88,2 (120)	59,5 (81)	160 (118)	88,2 (120)	88,2 (120)	160 (118)
Ширина захвата по дну борозды, м	0,7	0,7	-	0,8	-	0,5
Ширина минерализованной полосы, м	-	1,4	2,5-2,8	2,7	1,5	-
Глубина борозды, см	14	10-15	10-30	15-25	20	50
Производительность, км/ч	до 2,5	до 3,0	-	до 3,8	до 2,6	до 2,0

Источник: по данным [33] | Source: according to [33]

Таким образом, ранее в нашей стране существовали рекомендации по подбору системы машин для лесовосстановления из серийно производимых в стране моделей машин с учетом зоны применения и технических характеристик. Но в настоящее время большая часть оборудования (см. табл. 1 и табл. 2) морально устарели, а многие лесохозяйственные машины и базовые тракторы уже не производятся. С учетом произошедших в стране экономических преобразований и трансформации лесного хозяйства, в настоящее время эти рекомендации значительно потеряли в актуальности. Ориентация на зарубежный опыт и машины иностранного производства оказалась ошибочной стратегией, так как экономические и природно-производственные условия между странами различаются, а дорогие зарубежные машины малодоступны.

В настоящее время для лесовосстановления на лесных гарях и горельниках используются та же техника и технологии, что и при проведении лесовосстановительных работ на лесных территориях после вырубке леса. Однако, если при проведении лесовосстановления на вырубках имеются подъездные пути для доставки необходимой техники и материалов, а также специально оборудованные площадки для техники, то при проведении работ на гарях и горельниках они, как правило, отсутствуют.

Обострение проблемы лесных пожаров вызывает необходимость применения высокоэффективных отечественных способов и технических средств для лесовосстановления после пожаров. Тема обзорной статьи посвящена поиску современных способов и технических средств восстановления поврежденных пожарами лесных площадей и представляется актуальной для лесного комплекса.

Целью данного исследования является определение уровня технического развития отечественных современных способов и технических средств восстановления поврежденных пожарами лесных площадей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– изучить современные отечественные способы и технические средства в области восстановления лесных насаждений;

– установить тенденции развития отечественных способов и технических средств в области восстановления лесных насаждений.

### Материалы и методы

Исследование является теоретическим изысканием в виде обзора, базируется на анализе результатов интеллектуальной деятельности. Объект исследования: лесные площади, нарушенные рубками и пожарами. Предмет исследования: способы и технические средства для восстановления лесных площадей.

Для достижения цели исследования и решения поставленных задач использовались следующие методы.

1. Патентно-информационный поиск с последующей систематизацией собранного материала.

Патентно-информационный поиск проводился на сайте Федерального института промышленной собственности (ФИПС) следующим образом. На сайте ФИПС выбирали патентный поиск; вводили имя пользователя и пароль; далее выбирали базу данных «ПАТЕНТНЫЕ ДОКУМЕНТЫ РФ (РУС.)»; из предлагаемых форм документов выбирали всё, кроме «Заявки на российские изобретения» и переходили к поиску.

Поиск проводился по ключевым словам: «Способ восстановления лесов после пожаров», «Способ расчистки вырубок», «Восстановление гарей», «Подготовка почвы на гарях», «Машина для подготовки вырубке». После каждого поискового запроса проводился ручной отбор патентов изобретений и полезных моделей за последние 10 лет, начиная с даты публикации патента от 01.01.2013 г., представляющие собой технические решения, направленные на возможность применения для восстановления лесов, гарей после пожаров, а также подготовку почвы перед лесовосстановлением.

Информационный поиск проводился среди научных статей в периодических и непериодических изданиях, материалах конференции, научно-технической литературы. Среди информационных баз следует выделить наукометрические базы данных научной электронной библиотеки [elibrary.ru](http://elibrary.ru), [sciencedirect.com](http://sciencedirect.com), [researchgate.net](http://researchgate.net).

Поиск проводился по ключевым словам как на русском, так и на английском языке: «Лесовосстановление», «Горельник», «Гарь», «Посадки леса», «Лесохозяйственные машины», «Обработка почвы», «Расчистка территории»; «Reforestation», «Restoration after a fire», «Forest fire», «Burnt forest», «Dead wood and methods of combating it».

После каждого поискового запроса проводился ручной отбор публикаций за последние 10 лет, представляющие собой описание способов и техники, направленные на возможность применения для восстановления лесов, гарей после пожаров, а также подготовку почвы перед лесовосстановлением.

2. Метод сравнения, позволяющий установить достоинства и недостатки известных способов и технических средств.

Метод сравнения позволил кластеризовать отобранные патенты на изобретения и полезные модели, а также описанные способы по общим признакам.

3. Анализ и синтез, суть которых достаточно подробно раскрыта Левиным Г. Д. в работе [34].

Метод анализа использовался при познавательном переходе от общих характерных черт, изучаемых объекта и предмета исследования к частным их характеристикам. Метод синтеза использовался при упорядочивании данных, полученных в ходе анализа. Применение данного метода позволило определить уровень технического развития отечественных современных способов и технических средств восстановления лесных площадей, поврежденных пожарами, за последние 10 лет.

### Результаты

Для изучения известных способов и технических средств восстановления леса после пожаров был проведен анализ патентов изобретений и полезных моделей РФ, содержащихся в фондах. В результате поискового запроса и ручного отбора патентов были отобраны 40 технических решений.

На основе изучения научных статей и технических решений была создана классификация способов и технических средств в области восстановления лесных площадей, поврежденных пожарами, представленная на рис. 3.

На основе представленной классификации вручную были сформированы пять кластеров способов и технических средств за последние 10 лет, которые сведены в табл. 3.

В первые три кластера вошли способы, позволяющие более эффективно восстанавливать лесные площади, в остальные два кластера вошли технические средства, при помощи которых производят восстановление лесных площадей, поврежденных пожарами. Технические решения, направленные на возможность применения различных способов и технических средств для восстановления лесов, гарей после пожаров, а также подготовку почвы перед лесовосстановлением, с учетом кластеризации сведены в табл. 4 и в табл. 5.



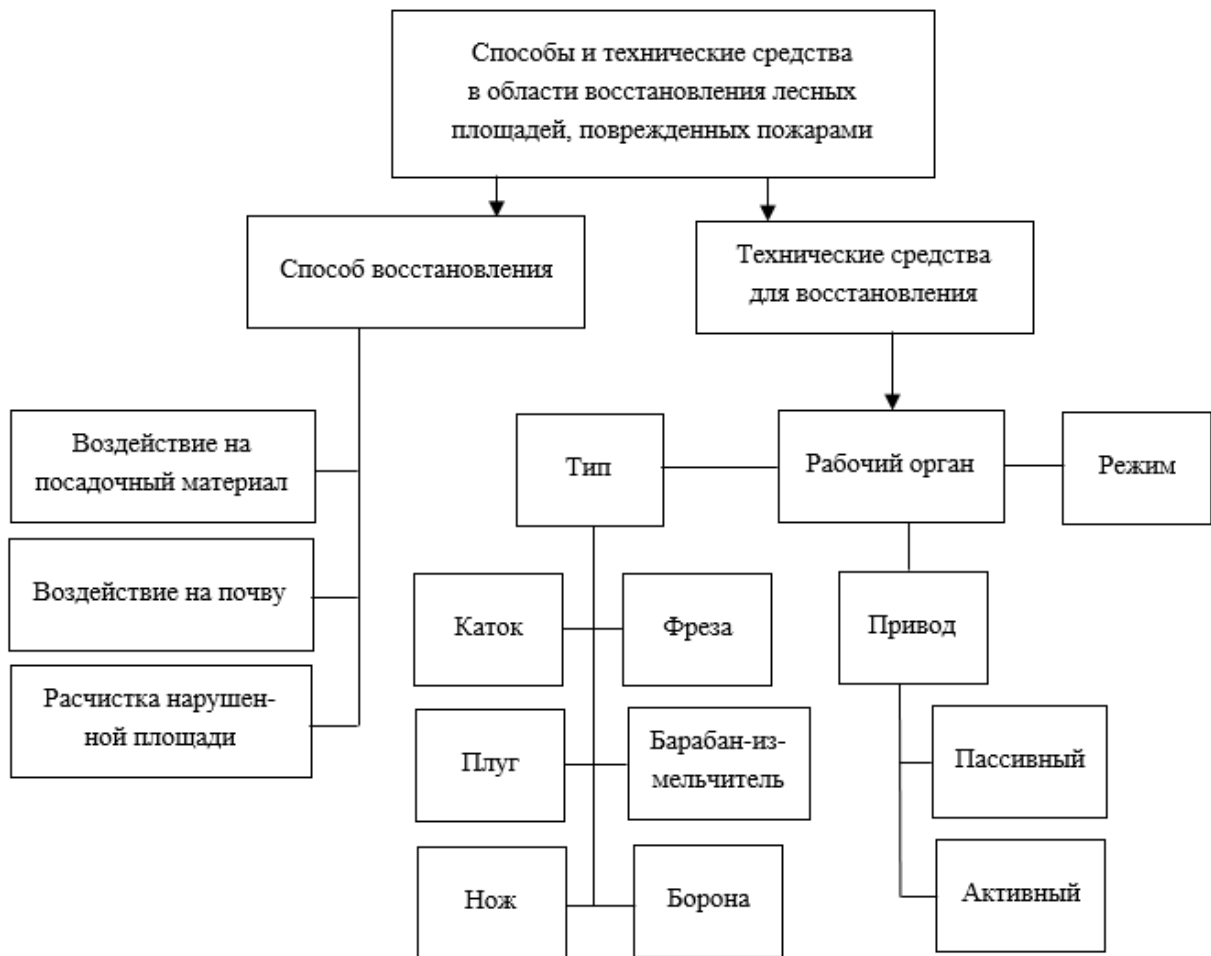


Рисунок 3. Классификация способов и технических средств в области восстановления лесных площадей

Figure 3. Classification of methods and technical means in the field of restoration of forest areas

Источник: собственная разработка авторов

Source: the authors' own development

Таблица 3

Кластеризация способов и технических средств в области восстановления лесных площадей, поврежденных пожарами

Table 3

Clustering of methods and technical means in the field of restoration of forest areas damaged by fires

Название кластера   Cluster name	Характеристика кластера   Characteristics of the cluster
Кластер 1	Способ воздействия на посадочный материал
Кластер 2	Способ воздействия на почву
Кластер 3	Способ расчистки нарушенной площади
Кластер 4	Технические средства с рабочим органом пассивного действия
Кластер 5	Технические средства с рабочим органом активного действия

Источник: собственная разработка авторов

Source: the authors' own development

Технические решения в области восстановления лесных площадей,  
поврежденных пожарами, запатентованные за последние 10 лет в Российской Федерации

Table 4

Technical solutions in the field of restoration of forest areas damaged by fires, patented over the past 10 years in the  
Russian Federation

№ п.п.   Item no.	Номер патента   Patent number	Название   Title	Патентообладатель   The patent holder	Год публикации   Year of publication	Номер кластера   Cluster number
1	2492627	Способ восстановления лесополосы после пожаров	Дагестанский государственный университет	2013	1
2	2643245	Способ лесовосстановления на горных склонах	Иркутский государственный университет путей сообщения	2018	1
3	2731345	Способ создания устойчивых лесных экосистем на отвалах, образованных при разработке угольных месторождений открытым способом	Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН	2020	1
4	2504942	Способ строчно-луночного посева лесных семян	Петрозаводский государственный университет	2014	2
5	2560187	Способ высадки посадочного материала с закрытой корневой системой лесозаготовительной машиной	Петрозаводский государственный университет	2015	2
6	2706158	Способ рекультивации земель под древесно-кустарниковой растительностью, пораженной лесными пожарами	Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова	2019	2
7	2737195	Способ посадки саженцев лесопосадочной машиной	Петрозаводский государственный университет	2020	2
8	2714705	Способ восстановления леса	Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова	2020	2
9	2760705	Способ выращивания сеянцев ели, сосны, лиственницы, кедра сибирского в открытом грунте с использованием устройств и приспособлений	Чиликов Б.Д.	2021	2
10	2757381	Способ очистки мест рубок	Уральский государственный лесотехнический университет	2021	2
11	2779947	Устройство и способ пересадки саженцев	Иркутского государственного университета путей сообщения	2022	2
12	2782954	Способ создания лесных культур на переувлажненных песчаных землях	Федеральный научный центр агроэкологии РАН	2022	2

## Технологии. Машины и оборудование

№ п.п.   Item no.	Номер патента   Patent number	Название   Title	Патентообладатель   The patent holder	Год публикации   Year of publication	Номер кластера   Cluster number
13	2554447	Способ расчистки вырубок для искусственного лесовосстановления со сбором лесосечных отходов	Петрозаводский государственный университет	2015	3
14	2769472	Способ посадки, выращивания культур и выборочных рубок с заготовкой сортиментов машинами на возобновляемых искусственным путем лесных площадях	Поволжский государственный технологический университет	2022	3
15	141061	Машина для создания прерывистых микроповышений почвы	Петрозаводский государственный университет	2014	4
16	173955	Лесное почвообрабатывающее орудие	Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова	2017	4
17	176212	Машина для образования лунок для посадки растений в грунт	Петрозаводский государственный университет	2018	4
18	181473	Машина для подготовки посадочных мест	Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова	2018	4
19	177604	Лесопосадочная машина для семян с закрытой корневой системой	Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства	2018	4
20	198972	Лесопосадочная машина для осуществления лесовосстановительных работ на вырубках	Петрозаводский государственный университет	2020	4
21	199359	Лесопосадочная машина для лесовосстановления на вырубках	Петрозаводский государственный университет	2020	4
22	199369	Машина для лесовосстановительных работ	Петрозаводский государственный университет	2020	4
23	200708	Лесопосадочная машина с лесным плугом	Петрозаводский государственный университет	2020	4
24	198856	Машина лесопосадочная	Петрозаводский государственный университет	2020	4
25	198853	Лесопосадочная машина	Петрозаводский государственный университет	2020	4
26	2742659	Плуг комбинированный лесной	Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова	2021	4

## Технологии. Машины и оборудование

№ п.п.   Item no.	Номер патента   Patent number	Название   Title	Патентообладатель   The patent holder	Год публикации   Year of publication	Номер кластера   Cluster number
27	213599	Усовершенствованный лесной плуг	Бурятская государственная сельскохозяйственная академия имени В.Р. Филиппова	2022	4
28	2767361	Корчеватель	Волгоградский государственный технический университет	2022	4
29	217468	Комбинированное почвообрабатывающее орудие	Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова	2023	4
30	216995	Модернизированный лесной плуг	Бурятская государственная сельскохозяйственная академия имени В.Р. Филиппова	2023	4
31	220357	Лесной плуг	Бурятская государственная сельскохозяйственная академия имени В.Р. Филиппова	2023	4
32	2789357	Лесной плуг для образования микроповышений	Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова	2023	4
33	2535162	Лесная машина	Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова Россельхозакадемии	2014	5
34	138170	Машина для расчистки вырубок перед искусственным лесовосстановлением	Петрозаводский государственный университет	2014	5
35	158731	Машина для восстановления леса на вырубках	Петрозаводский государственный университет	2016	5
36	167259	Лесохозяйственная машина для рубок ухода за лесами	Государственный научный центр лесопромышленного комплекса	2016	5
37	168574	Машина для восстановления леса на вырубках	Петрозаводский государственный университет	2017	5
38	178892	Лесохозяйственная машина	Государственный научный центр лесопромышленного комплекса	2018	5
39	183264	Рабочий орган машины для среза и измельчения древесно-кустарниковой растительности и прокладки минерализованных полос	Петрозаводский государственный университет	2018	5
40	178801	Лесозаготовительная машина для сбора и транспортировки лесосечных отходов	Государственный научный центр лесопромышленного комплекса	2018	5

Источник: открытые данные ФИПС  
Source: FIPS open data

Технические решения в области восстановления лесных площадей,  
поврежденных пожарами, описанные в научных публикациях за последние 10 лет

Technical solutions in the field of restoration of forest areas damaged by fires,  
described in scientific publications over the past 10 years

№ п.п.   Item no.	Название публикации   Title of the publication	Аффилиация   Affiliation	Год публикации   Year of publication	Номер кластера   Cluster number
1	Совершенствование технологического комплекса технических средств для лесовосстановления на горельниках в Центрально-Черноземном регионе [35]	Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова	2013	3, 5
2	Технологии лесовосстановления сосняков в условиях степного Придонья (на примере Ростовской области) [36]	Филиал Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства «Южно-европейская НИЛОС»	2013	2, 3
3	Исследование влияния метода утилизации сгоревшей древесины горельников на дальнейшее повреждение травоядными растительности [37]	Университет Гранады (Испания)	2013	2, 3
4	Генетический аспект восстановления леса на гарях [12]	Естественнонаучный институт Пермского государственного национального исследовательского университета; Центр защиты леса Новгородской области	2014	1
5	Санитарные рубки древесины на лесных гарях изменяют видовой состав, сокращают площадь растительного покрова, богатство и разнообразие средиземноморских растительных сообществ [38]	Университет Гранады (Испания); Андалузский институт сельскохозяйственных исследований и профессиональной подготовки (Испания)	2014	3
6	Особенности разработки и лесовосстановления горельников в лесостепной зоне [39]	Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства; Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова	2015	2, 3
7	Удаление кустарника на восстановленных после пожара территориях увеличивает богатство местных видов растений [29]	Калифорнийский университет (США)	2016	2, 3
8	Особенности лесовосстановления на вырубках и гарях в Сомовском лесничестве Воронежской области [40]	Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова	2017	2, 3
9	Особенности восстановления древостоев сосны крымской в постпирогенный период [41]	Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН	2017	3

№ п.п.   Item no.	Название публикации   Title of the publication	Аффилиация   Affiliation	Год публикации   Year of publication	Номер кластера   Cluster number
10	Особенности роста сеянцев сосны при лесовосстановлении горельников в лесостепной зоне [42]	Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова	2017	1, 2
11	Совершенствование технологий выращивания посадочного материала и лесовосстановления на горельниках [32]	Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства	2019	1, 2
12	Влияние способа лесовосстановления горельников на свойства почвы и восстановление выгоревших территорий на границе между дикой природой и городом, на примере пожаров в районе города Хайфа [43]	Хайфский университет (Израиль); Университет Вагенингена (Нидерланды); Университет Ньюкасла (Австралия)	2019	2
13	Исследование влияния травянистого яруса на восстановление сосны приморской ( <i>Pinus pinaster Aiton</i> ) после пожара на примере двух возрастных групп саженцев [16]	Университет Порту (Португалия); Университет Гранады (Испания)	2019	2
14	Справочник по передовому опыту лесопользования на горельниках [44]	Университет Жироны (Каталония)	2019	2, 3
15	Послепожарная эволюция лесных экосистем на песчаных террасах Юго-Восточного Прибайкалья [45]	Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН; Рослесозащита – Центр защиты леса Республики Бурятия; Бурятская государственная сельскохозяйственная академия имени В. Р. Филиппова	2020	2
16	Десятилетнее исследование влияния способов лесовосстановления горельников на концентрацию углерода в почве и питательных веществ в сгоревшем средиземноморском лесу [23]	Университет Коимбры (Португалия); Институт биологических исследований Парагвая (Парагвай); Университет Гранады (Испания)	2021	3
17	Совокупное воздействие санитарных рубок и расчистки лесосек на эрозию, показатели функционирования почвы и растительность в горельниках на северо-западе Испании [46]	Хунта-де-Галисия (Испания); Испанское общество лесных наук (Испания)	2021	2, 3
18	Эффективность послепожарного восстановления с использованием двух методов подготовки почвы и различных видов кустарников в сосновых лесах юго-восточной Испании [28]	Университет Кастилия-Ла-Манча (Испания); Читтагонгский университет (Бангладеш); Университет Реджо-Ди-Калабрии (Италия)	2022	1, 2
19	Пространственные и временные характеристики формирования древостоев, а также высоты деревьев в лесных культурах заложенных на грязах [47]	Университет штата Вашингтон (США); Университет Колорадо (США); Севани: университет Юга (США); Лесная служба США; Университет Айдахо (США)	2022	2, 3

№ п.п.   Item no.	Название публикации   Title of the publication	Аффилиация   Affiliation	Год публикации   Year of publication	Номер кластера   Cluster number
20	Обработка мульчированием способствует восстановлению множества функций лесных экосистемы после крупного пожара на северо-западе Испании [48]	Леонский университет (Испания)	2022	2
21	Восстановление сфагновых болот после пожаров на объектах Дикой природы Тасмании (Всемирного наследия ЮНЕСКО) [49]	Университет Тасмании (Австралия)	2022	2
22	Разработка повреждённых низовым пожаром горельников системой машин «харвестер + форвардер» [50]	Поволжский государственный технологический университет	2022	3
23	Способы лесовосстановления и использование валежной древесины после пожара: влияние на естественное возобновление и динамику растительности на пробных площадках [51]	Падуанский университет (Италия); Туринский университет (Италия)	2023	3
24	Среднесрочное изменение свойств почвы и разнообразие растений в ползасушливом сосновом лесу после ликвидации последствий лесного пожара [24]	Университет Кастилия-Ла-Манча (Испания); Ланьчжонский университет (Китай); Кливлендский государственный университет (США); Мадридский технический университет (Испания); Средиземноморский университет Реджо-Ди-Калабрии (Италия)	2023	2, 3
25	Пролонгированное влияние стимуляторов роста на выращивание посадочного материала ели корейской ( <i>Picea koraiensis</i> ) [26]	Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН	2023	1

Источник: открытые данные  
Source: open data

На территории Российской Федерации патенты получают организации, а также частные лица. Большинство документов по патентованию в области восстановления лесных площадей, поврежденных пожарами, за последние 10 лет в Российской Федерации получено следующими организациями: Петрозаводским государственным университетом, Воронежским государственным лесотехническим университетом имени Г.Ф. Морозова, Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В.Р. Филиппова, АО «Государственный научный центр лесопромышленного комплекса», Иркутским государственным университетом путей сообщения, а также другими организациями.

На основании данных табл. 4 в Microsoft Excel была проведена визуализация данных при помощи кластеризованной столбчатой диаграммы, представленной на рис. 4.

По кластерам запатентованные технические решения распределились следующим образом:

- по способу воздействия на посадочный материал (кластер 1) – 7,5%;
- по способу воздействия на почву (кластер 2) – 22,5%;
- по способу расчистки нарушенной площади (кластер 3) – 5,0%;
- технические средства с рабочим органом пассивного действия (кластер 4) – 45,0%;

– технические средства с рабочим органом активного действия (кластер 5) – 20,0%.

Основная часть запатентованных за последние 10 лет в РФ технических решений в области восстановления лесных площадей, поврежденных пожарами, направлена на создание способов воздействия на почву (кластер 2) и разработку технических средств (кластеры 4 и 5).

На основании данных табл. 5 в Microsoft Excel была проведена визуализация данных при помощи кластеризованной столбчатой диаграммы, представленной на рис. 5. Данные по кластерам на основе изучения публикаций в научных статьях формировались с учётом того, что в одной статье предлагались различные технические решения в области восстановления лесных площадей, поврежденных пожарами.

По кластерам технические решения в опубликованных научных статьях распределились следующим образом:

– по способу воздействия на посадочный материал (кластер 1) – 13,2%;

– по способу воздействия на почву (кластер 2) – 44,7%;

– по способу расчистки нарушенной площади (кластер 3) – 39,5%;

– технические средства с рабочим органом пассивного действия (кластер 4) – 0,0%;

– технические средства с рабочим органом активного действия (кластер 5) – 2,6%.

Большинство технических решений запатентовано в следующих годах: 2020 г. – 22,5%; 2018 г. – 17,5%; 2022 г. – 12,5%; 2014 г. – 10,0% и 2023 г. – 10,0%. Публикаций было больше всего в следующих годах: 2023 г. – 20,0%, 2019 г. – 16,0%, 2017 г. – 12,0%, 2013 г. – 12,0%, 2014 г. – 8,0%.

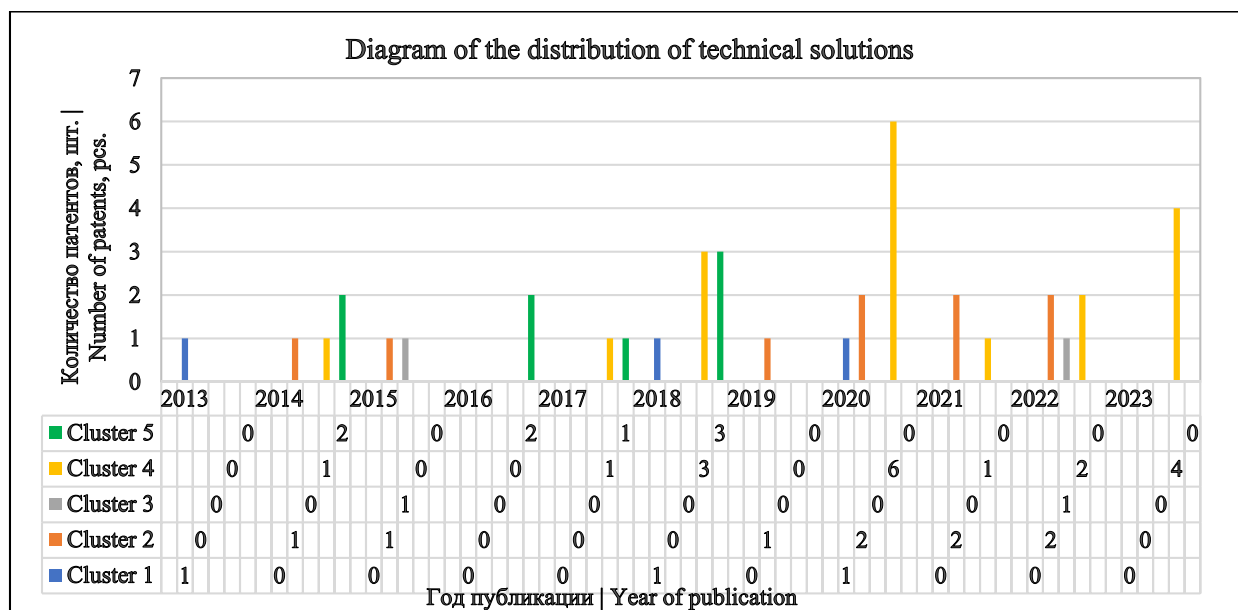


Рисунок 4. Кластеризованная столбчатая диаграмма распределения технических решений в области восстановления лесных площадей, поврежденных пожарами, запатентованных за последние 10 лет  
 Figure 4. A clustered bar chart of the distribution of technical solutions in the field of restoration of forest areas damaged by fires, patented over the past 10 years

Источник: собственная разработка авторов

Source: the authors' own development



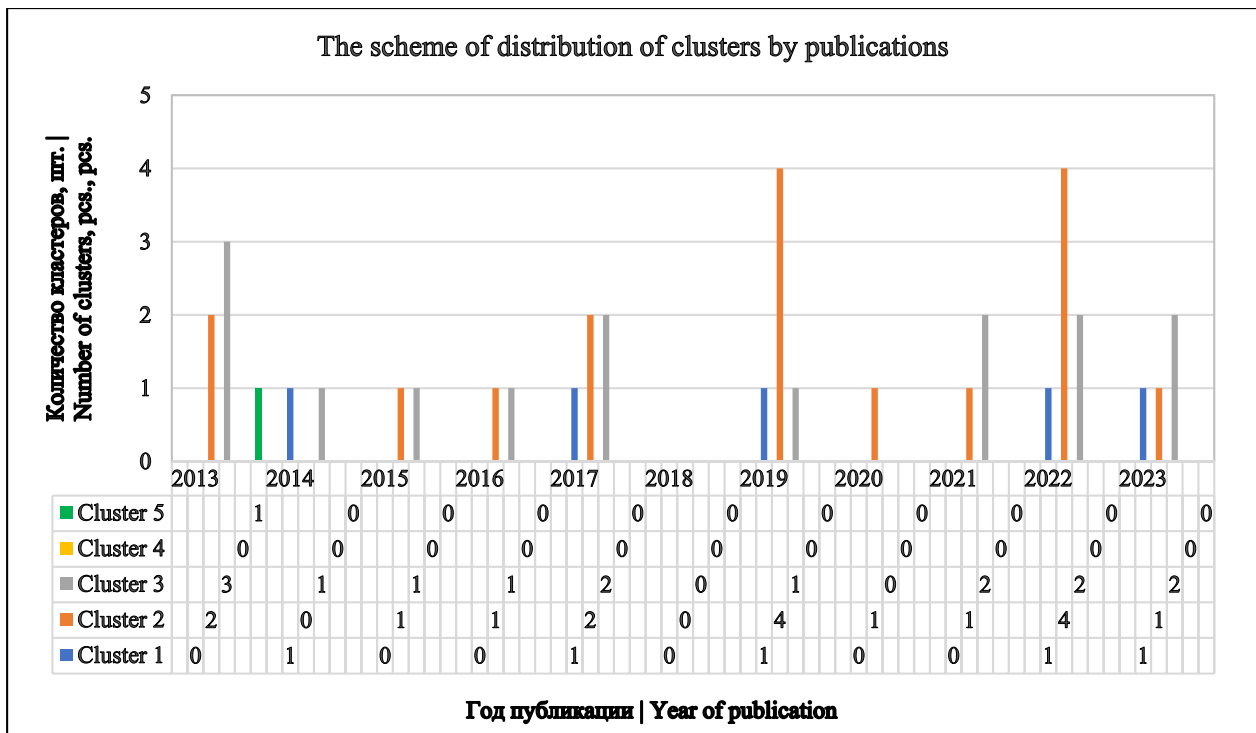


Рисунок 5. Кластеризованная столбчатая диаграмма распределения технических решений в области восстановления лесных площадей, поврежденных пожарами, описанные в научных публикациях за последние 10 лет  
 Figure 5. A clustered bar chart of the distribution of technical solutions in the field of restoration of forest areas damaged by fires, described in scientific publications over the past 10 years

Источник: собственная разработка авторов  
 Source: the authors' own development

В ходе анализа публикаций в научных статьях установлено, что их большая часть посвящена рассмотрению способов воздействия на почву (кластер 2) и способов расчистки нарушенной площади (кластер 3), в меньшей степени рассмотрению способов воздействия на посадочный материал (кластер 1) и совсем незначительная их часть посвящена рассмотрению технических средств с рабочим органом активного (кластер 5) действия. При этом значительная доля публикаций охватывает сразу несколько кластеров. Наиболее часто встречается сочетание кластеров 2 и 3 – 36,0 %, реже кластеров 1 и 2 – 12,0 %.

В работах [52, 53] отмечено, что при воздействии на почву высокой температуры происходят ее стерилизация и уничтожение полезных для корневых систем растений микроорганизмов. Одной из известных полезных функций мульчирования является создание благоприятной среды для микроорганизмов.

В работе [54] рассмотрено устройство мульчеров и раскрыт принцип их работы. Применение мульчеров для подготовки гарей и горельников перед лесовосстановлением позволит измельчить неликвидную древесину в щепу и одновременно с этим образовавшуюся щепу смешать с разрыхленным слоем почвы. При этом в зависимости от интенсивности лесного пожара, степени повреждения почвенного покрова путем корректировки глубины обработки почвы создать требуемый для данных условий субстрат, обогатив обедненную почву измельченной древесиной.

В работе [55] отмечено, что мульча из щепы достаточно хорошо обеспечивает древесные породы питательными веществами и выполняет роль дополнительного резерва органического вещества. Также зарубежные ученые в своих работах [46, 56, 57] приводят сведения о положительном влиянии подготовки лесной почвы перед лесовосстановлением, проводимом в том числе на гарях.

Еще одно достоинство использования мульчеров – это выравнивание поверхности почвы путем измельчения пней, устранения кочек, крупных корней, находящихся в верхних слоях почвы, что обеспечивает возможность использования на данной территории лесопосадочных машин. Стоит отметить, что при установке на мульчерный рабочий орган в качестве режущих элементов инструмента с карбидвольфрамовыми наконечниками, такой рабочий орган может работать на каменистой почве.

В работах [58, 59] отмечено, что предварительная обработка почвы на горях и горельниках путем мульчирования способствует активизации процессов естественного возобновления лесных площадей.

Мульчерный рабочий орган одновременно с измельчением древесины может осуществлять и перемешивание почвы с предварительно раскиданными по ней удобрениями. Мульчерные рабочие органы могут также использоваться и при создании противопожарных полос.

### Обсуждение

Изучены существующие рекомендации по лесовосстановлению на площадях, пройденных лесными пожарами, включая рекомендованные технологические комплексы машин. Отмечено, что не все машины и базовые тракторы из рекомендаций производятся в настоящее время.

При лесовосстановлении на горях и горельниках в настоящее время обычно используются те же технологии и машины, что и при лесовосстановлении на вырубках. Однако эффективность с учетом природно-производственных условий оказывается зачастую не на самом высоком уровне. Это объясняется тем, что исходные факторы при лесовосстановлении на вырубках и лесовосстановлении на горях и горельниках существенным образом отличаются. Следовательно, логично предположить, что выбор технологии лесовосстановления осуществляемого в целях восстановления полезных функций леса, их биологического разнообразия, должен выбираться с учетом исходного состояния подлежащей лесовосстановлению территории.

После вырубки лесная подстилка остается в исходном состоянии, а в результате огневого воз-

действия при пожаре происходит существенное изменение свойств лесной подстилки, влияющее на ее плодородие, при этом стоит отметить, что вид пожара (верховой, низовой, торфяной) также существенным образом влияет на степень изменения условий произрастания растений.

Например, при пожаре большой ущерб наносится лесной подстилке и низкорастущим растениям, при этом верхний слой почвы лишается защитного слоя из опавших с деревьев листьев, хвои, происходит потеря связи частиц почвы между собой, в результате чего возникает опасность эрозии плодородной почвы и оголения ее поверхности. Оголение поверхности почвы, кроме ухудшения ее плодородных свойств, также негативно сказывается и на взаимодействии систем: «двигатель лесной машины»-«почва»; «рабочий орган»-«почва». Чем меньше проходов по территории, пройденной огнем, совершат лесные машины, тем меньше будет негативное воздействие на почву.

В зависимости от степени повреждения почвенного покрова, ее первоначального состава и плодородия требуются разная глубина ее обработки и использование различных полезных элементов. Поэтому лесные машины, используемые при лесовосстановлении гарей и горельников должны позволять изменять глубину воздействия на почву.

Искусственное лесовосстановление на данных территориях затруднено, поскольку зачастую к поврежденным пожарами лесным территориям нет подъездных путей для движения лесной техники, кроме того, для искусственного лесовосстановления нужен посадочный материал, потребный объем которого заранее спрогнозировать очень проблематично. Из-за того, что доставка лесных машин на такие территории затруднительна, то машины, выполняющие сразу несколько операций, например, расчистка и подготовка почвы, являются более предпочтительным выбором.

При лесных пожарах обычно повреждается большая по площади территория, что требует проведения работ по содействию естественному лесовосстановлению для скорейшего восстановления лесной территории с ее полезными функциями. Как показал проведенный анализ способы, касающихся восста-

новления поврежденных пожарами лесных площадей, основываются на обработке поверхностного слоя почвы с целью повышения его плодородных свойств. При этом глубина обработки и ее вид, например, механическое перемешивание с нижележащими слоями, внесение мульчи и т.д. должны выбираться исходя из степени повреждения почвенного покрова огневым воздействием.

Результаты данной работы могут быть использованы организациями, занимающимися лесовосстановлением лесных территорий, поврежденных пожарами, для обоснованного выбора наиболее эффективного с учетом конкретных условий проведения работ способа и необходимых для его реализации технических устройств.

### Заключение

Восстановление леса на гарях и горельниках представляет собой достаточно сложную проблему для лесного комплекса вследствие необходимости учета множества различных факторов, основными из которых являются: состав и возраст бывшего насаждения, состояние гарей, тип лесорастительных условий, наличие необходимых средств механизации и ряд других.

Ввиду существенного отличия в состоянии почвенного покрова на гарях и горельниках многими университетами и научными институтами нашей страны за последние 10 лет проводился поиск и разработка технических решений по проведению лесовосстановления применительно к поврежденным пожарами территориям.

Установлены тенденции развития отечественных способов и технических средств в области восстановления лесных насаждений. В ходе проведенного патентно-информационного поиска и анализа научно-технической литературы выделено пять кластеров. В первые три кластера вошли способы, позволяющие более эффективно восстанавливать лесные площади, в четвертый и пятый кластеры вошли технические средства пассивного и активного действия, позволяющие эффективно производить восстановление лесных площадей, поврежденных пожарами.

Предлагаемые нашими учеными и организациями современные отечественные способы и технические средства в области восстановления лесных насаждений по кластерам распределились следующим образом:

- по способу воздействия на посадочный материал (кластер 1) – 12,3 %;
- по способу воздействия на почву (кластер 2) – 26,3 %;
- по способу расчистки нарушенной площади (кластер 3) – 14,0 %;
- технические средства с рабочим органом пассивного действия (кластер 4) – 31,6 %;
- технические средства с рабочим органом активного действия (кластер 5) – 15,8 %.

Анализ результатов проведенного патентно-информационного исследования показал, что при изучении технического уровня развития технических средств (кластеры 4, 5), применяемых при восстановлении нарушенных пожаром территорий, с целью синтеза новых технических решений следует первоочередное внимание уделить изучению патентного фонда, а при поиске путей повышения эффективности способов воздействия на почву и способов расчистки нарушенной пожаром площади (кластеры 2, 3) первоочередное внимание следует уделить анализу публикаций.

Анализ публикаций показал, что перспективным является использование машин с активным рабочим органом мульчерного типа, способных измельчать оставшиеся на гарях и горельниках обгоревшие остатки лесной растительности, и одновременно с этим обрабатывать почвенный покров путем перемешивания поврежденного огневым воздействием верхнего почвенного покрова с более глубокими не поврежденными пожаром ее слоями. Однако, для широкого применения на практике пока не хватает обобщения опыта и разработки рекомендаций по применению мульчеров при лесовосстановлении лесных территорий, пройденных лесными пожарами с учетом лесорастительных условий и состояния древесной растительности. Авторы планируют продолжить работу по изучению применения машин мульчерного типа на гарях и горельниках.

## Список литературы

1. Salimova G., Ableeva A., Lubova T., Sharafutdinov A., Araslanbaev I. Multidimensional modeling of the economy of forest management and reforestation. *Ecological Modelling*. 2022; Vol. 472. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.110098>.
2. Donato D.C., Halofsky J.S., Churchill D.J., Haugo R.D., C. Cansler A., Smith A., Harvey B.J. Does large area burned mean a bad fire year? Comparing contemporary wildfire years to historical fire regimes informs the restoration task in fire-dependent forests. *Forest Ecology and Management*. 2023; Volume 546. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121372>. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112723006060>.
3. Мануковский А.Ю., Макарова Ю.А. Исследование восстановления лесных площадей, пострадавших из-за пожаров. *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. 2018; Т. 6; 3 (39): 87-91. Режим доступа: <https://elibrary.ru/ypclx>.
4. Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г. Климатические изменения и лесные пожары в России. *Лесоведение*. 2013; 5: 50-61. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20370655>.
5. Чучалина А.А., Санникова Н.С. Влияние низовых пожаров на возобновление хвойных видов в сосняке бруснично-чернично-зеленомошном. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2013; 3 (41): 13-16. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19425397>.
6. Соколова Г.Г. Влияние сельскохозяйственных палов на травяной покров березовых лесов Алтайского края. *Известия Алтайского государственного университета*. 2014; 3-1 (83): 84-88. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21741785>.
7. Казанцева М.Н., Мухамадиева Р.Р. Начальный этап восстановления растительного покрова на гарях сосняков лишайниковых в южной части Тюменской области. *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2023; 64: 196-200. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54795587>.
8. Буряк Л.В., Каленская О.П. Влияние пожаров на формирование насаждений Нижнего Приангарья. *Монография*. 2020; 140 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13500452>.
9. Sirolli H., Torrella S.A. The role of secondary forest in the survival and growth of native species: Tree planting field experiment in the delta of the Paraná River (Argentina). *Forest Ecology and Management*. 2023; Volume 546. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121329>. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112723005637>.
10. Утюк В.О., Иванисова Н.В. Естественное возобновление древостоя после низовых пожаров в Ростовской области. *Тимирязевский биологический журнал*. 2023; 1: 68-72. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54758296>.
11. Грязькин А.В., Гаврилова О.И., Чэн Т., Семенова Е.И. Структурные особенности лесных фитоценозов формирующихся на скальниках после пожара. *Лесной вестник. Forestry Bulletin*. 2023; 27; 3: 18-25. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53944397>.
12. Rogozin M.V., Golikov A.M. Генетический аспект восстановления леса на гарях. В сборнике: *Проблемы устойчивого управления лесами Сибири и Дальнего Востока. Материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 75-летию образования Дальневосточного научно-исследовательского института лесного хозяйства*. 2014; 335-339. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53812083>.
13. Churchill D.J., Jeronimo S.M.A., Hessburg P.F., Cansler C.A., Povak N.A., Kane V.R., Lutz J.A., Larson A.J. Post-fire landscape evaluations in Eastern Washington, USA: Assessing the work of contemporary wildfires. *Forest Ecology and Management*. 2022; Volume 504. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119796>. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112721008872>.
14. Šebesta J, Rogers P.C., Maděra P., Koutecký T., Dufour S., Řepka R. Long-term effects of mechanical site preparation on understorey plant communities in lowland floodplain forests. *Forest Ecology and Management*. 2021; Vol. 480: DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118651>.

15. Петров А.С., Виньковская О.П. Состояние лесовосстановления в Качугском лесничестве Иркутской области. Вестник ИРГСХА. 2023; 116: 110-123. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53979667>.
16. Castro J., Leverkus A.B. Effect of Herbaceous Layer Interference on the Post-Fire Regeneration of a Serotinous Pine (*Pinus pinaster* Aiton) across Two Seedling Ages. *Forests*. 2019; Vol. 10. Issue 1: 74. DOI: <http://doi.org/10.3390/f10010074>.
17. Fisher R.F., Fox T.R., Harrison R.B., Terry T. Forest soils education and research: Trends, needs, and wild ideas. *Forest Ecology and Management*. 2005; Vol. 220 (1-3): 1-16. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.001>.
18. Atutova Zh.V. Post-fire restoration of pine forests in the Badary area, Tunkinskiy national park, Russia. *Nature Conservation Research*. 2023; 8; 2: 22-32. DOI: 10.24189/ncr.2023.010.
19. González-Díaz P., Jump A.S., Perry A., Wachowiak W., Cavers S., Lapshina E. Ecology and management history drive spatial genetic structure in Scots pine. *Forest Ecology and Management*. 2017; Vol. 400: 68-76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.05.035>.
20. North M.P., Latimer A.M., Welch K.R., Young D.J.N., Buckley T.N., Vice H., Stevens J.T., York R.A., Axelson J.N., Shive K.L., Tubbesing C.L., Werner C.M., Wyrsh P., Greene D.F., Coppoletta M., Knapp E.E., Restaino C.M., Tompkins R.E., Estes B.L., Hager R.N. et al. Tamm Review: Reforestation for resilience in dry western U.S. forests. *Forest Ecology and Management*. 2019; Vol. 432: 209-224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.09.007>.
21. Прокушкин С.Г., Зырянова О.А. О влиянии деревьев лиственницы Гмелина на послепожарное восстановление лесного фитоценоза в криолитозоне Средней Сибири. *Сибирский экологический журнал*. 2013; 20; 5: 645-652. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20210731>.
22. Шварц Е.А., Стариков И.В., Харламов В.С., Ярошенко А.Ю., Шматков Н.М., Кобяков А.В., Птичников А.В., Луковцев Ф.Ю., Тюленева О.В., Голунов Р.Ю., Щеголев А.А. Новый взгляд на развитие лесного комплекса: Ч. 3. Фундаментальные основы нового леса. Использование и охрана природных ресурсов в России. 2021; 1 (165): 30-39. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45670893>.
23. Juan-Ovejero R., Molinas-González C.R., Leverkus A.B., Martín Peinado F. J., Castro J. Decadal effect of post-fire management treatments on soil carbon and nutrient concentrations in a burnt Mediterranean forest. *Forest Ecology and Management*. 2021; Vol. 498. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119570>.
24. Gómez-Sánchez M.E., Navidi M., Ortega R. (et al.) Medium-term associations of soil properties and plant diversity in a semi-arid pine forest after post-wildfire management. *Forest Ecology and Management*. 2023; Vol-ume 545. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121163>. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112723003973>.
25. Бойко Т.А., Напалкова Ю.А. Влияние пожаров на естественное возобновление на территории Краснокамского участкового лесничества Закамского лесничества. В сборнике: Материалы I национ. конф. по итогам научной и производственной работы преподавателей и студентов в области ландшафтной архитектуры и лесного дела. ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова». 2019; 37-42. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38073788>.
26. Острошенко В.Ю. Пролонгированное влияние стимуляторов роста на выращивание посадочного материала ели корейской *Picea koraiensis* Nakai. Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2023; 18; 3: 309-319. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54661938>.
27. Stevens J.T., Haffey C.M., Coop J.D. (et al.) Tamm Review: Postfire landscape management in frequent-fire conifer forests of the southwestern United States. *Forest Ecology and Management*. 2021; Vol. 502. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119678>.
28. Matallana R.G., Lucas-Borja M.E., Gómez-Sánchez M.E., Uddin S.M.M., Zema D.A. Post-fire restoration effectiveness using two soil preparation techniques and different shrubs species in pine forests of South-Eastern Spain. *Ecological Engineering*. 2022; Vol. 178: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106579>.

29. Bohlman G.N., North M., Safford H.D. Shrub removal in reforested post-fire areas increases native plant species richness. *Forest Ecology and Management*. 2016; Vol. 374: 195-210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.05.008>.
30. Lind B.M., North M.P., Maloney P.E., Eckert A.J. Effect of fire and thinning on fine-scale genetic structure and gene flow in fire-suppressed populations of sugar pine (*Pinus lambertiana* Dougl.). *Forest Ecology and Management*. 2019; Vol. 447: 115-129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.04.033>.
31. Steckel M., Heym M., Wolff B., Reventlow D.O.J., Pretzsch H. Transgressive overyielding in mixed compared with monospecific Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and oak (*Quercus robur* L., *Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) stands – Productivity gains increase with annual water supply. *Forest Ecology and Management*. 2019; Vol. 439: 81-96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.038>.
32. Проказин Н.Е., Родин С.А., Казаков В.И., Лобанова Е.Н., Казаков И.В. Совершенствование технологий выращивания посадочного материала и лесовосстановления на горельниках. *Лесохозяйственная информация*. 2019; 3: 38-47. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39263392>.
33. Рекомендации по планированию и проектированию фонда лесовосстановления на площадях, пройденных лесными пожарами и ветровалами. Пушкино: ВНИИЛМ. 2019; 36. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43825305>.
34. Левин Г.Д. Классическая теория анализа и синтеза. *Философия науки и техники*. 2020: Т. 25; 2: 103-115. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44526604>.
35. Гончаров П. Э., Попиков П. И., Пономарёв С. В., Шабанов М. Л., Меняйлов К. А. Совершенствование технологического комплекса технических средств для лесовосстановления на горельниках в Центрально-Черноземном регионе // *Лесотехнический журнал*. 2013. №1 (9). С. 116-126. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20164097>.
36. Чукарина А. В. Технологии лесовосстановления сосняков в условиях степного Придонья (на примере Ростовской области) // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2013. №35. С. 100-103. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22574341>.
37. Castro J. Postfire Burnt-Wood Management Affects Plant Damage by Ungulate Herbivores. *International Journal of Forestry Research*. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/965461>.
38. Leverkus A., Lorite J., Navarro F., Sánchez-Cañete E., Castro J. Post-fire salvage logging alters species composition and reduces cover, richness, and diversity in Mediterranean plant communities. *Journal of environmental management*. 2014. Vol. 133. Pp. 323-331. DOI: [doi:10.1016/j.jenvman.2013.12.014](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.014).
39. Проказин Н. Е., Бартнев И. М., Казаков В. И., Лобанова Е. Н. Особенности разработки и лесовосстановления горельников в лесостепной зоне // *Лесотехнический журнал*. 2015. №1 (17). С. 85-97. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23576045>.
40. Тырченкова И. В. Особенности лесовосстановления на вырубках и гарях в Сомовском лесничестве Воронежской области // *Лесотехнический журнал*. 2017. №3 (27). С. 157-166. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30468610>.
41. Коба В.П. Особенности восстановления древостоев сосны крымской в постпирогенный период // *Экосистемы*. 2017. №11 (41). С. 10-13. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30784158>.
42. Проказин Н. Е., Бартнев И. М., Казаков В. И., Лобанова Е. Н. Особенности роста семян сосны при лесовосстановлении горельников в лесостепной зоне // *Лесотехнический журнал*. 2017. №2 (26). С. 91-96. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29825788>.
43. Wittenberg L., Keesstra S., Tessler N. Post-fire management treatment effects on soil properties and burned area restoration in a wildland-urban interface, Haifa Fire case study. *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 716. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2019.135190](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135190).
44. Mauri E., Pons P. Handbook of good practices in post-wildfire management. Universitat de Girona. 2019. 171 p. ISBN: 978-84-8458-564-0.

45. Гынинова А. Б., Убугунов Л. Л., Куликов А. А., Гынинова Б. Д., Гончиков Б. Н., Бадмаев Н. Б., Сымпилова Д. П. Послепожарная эволюция лесных экосистем на песчаных террасах Юго-Восточного Прибайкалья // Сибирский экологический журнал. 2020. Т. 27. № 1. С. 13-25. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42347250>.
46. Fernández C., Fontúrbel T., Vega J.A. Cumulative effects of salvage logging and slash removal on erosion, soil functioning indicators and vegetation in a severely burned area in NW Spain. *Geoderma*. 2021; Vol. 393. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115004>.
47. Andrus R., Droske C., Franz M., Hudak AT., Leigh L., Lewis S., Morgan P., Robichaud P., Meddens A. Spatial and temporal drivers of post-fire tree establishment and height growth in a managed forest landscape. *Fire Ecology*. 2022. DOI: 18. 10.1186/s42408-022-00153-4.
48. Marcos E., Huerta S., Fernández-García V., Prieto I., Pinto P. P., Ansola G., Sáenz de Miera L., Calvo L. Mulching treatments favour the recovery of ecosystem multifunctionality after a large wildfire in Northwest Spain. 2022. Pp. 1234-1239. DOI: 10.14195/978-989-26-2298-9\_187.
49. Prior L., Nichols S., Williamson G., Bowman D. Post-fire restoration of Sphagnum bogs in the Tasmanian Wilderness World Heritage Area, Australia. *Restoration Ecology*. 2022. Vol. 31. DOI: 31. 10.1111/rec.13797.
50. Ширнин Ю. А., Ширнин А. Ю., Денисов С. А., Волдаев М. Н., Шарнин И. В. Разработка повреждённых низовым пожаром горельников системой машин "харвестер + форвардер" // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2022. №2 (54). С. 55-63. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49208675>.
51. Lingua E., Marques G., Marchi N., Garbarino M., Marangon D., Taccaliti F., Marzano R. Post-Fire Restoration and Deadwood Management: Microsite Dynamics and Their Impact on Natural Regeneration. *Forests*. 2023. Vol. 14. DOI: 10.3390/f14091820.
52. Одноралов Г.А., Тихонова Е.Н., Голядкина И.В., Малинина Т.А. Оценка биологической продуктивности лесной среды в условиях урбанизации (на примере Воронежской нагорной дубравы). *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2020; 2 (374): 60-72. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42654444>.
53. Родин С.А., Проказин Н.Е., Казаков В.И., Лобанова Е.Н., Пентелькина Н.В., Румянцева С.А., Чеплянский И.Я. Рекомендации по планированию и проектированию фонда лесовосстановления на площадях, пройденных лесными пожарами и ветровалами. 2019: 36. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43825305>.
54. Малюков С.В., Панявина Е.А., Аксенов А.А. Анализ конструкций мульчеров и ротаторов. *Лесотехнический журнал*. 2019; 1 (33): 159-167. Режим доступа: <https://elibrary.ru/zfeegt>.
55. Ивашнев М.В. Научные основы совершенствования машин для удаления древесно-кустарниковой растительности при непрерывном движении базового трактора : дис. ... д-ра техн. наук : 05.21.01. 2020; 316. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54471861>.
56. Löf M., Dey D.C., Navarro R.M., Jacobs D.F. Mechanical site preparation for forest restoration. *New Forests*. 2012; Vol. 43 (5-6): 825-848. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11056-012-9332-x>.
57. Curran M.P., Murray M.P. Soil disturbance, amelioration and rehabilitation affect forest growth, health, soil carbon and chemistry on five long-term soil productivity (LTSP) sites in southeastern British Columbia. *Forest Ecology and Management*. 2023; Vol. 546. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121362>. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112723005960>.
58. Тарасов П.А., Бакшеева Е.О., Иванов В.А. Исследования влияния мульчирования сплошной вырубке на температуру почвы. *Вестник КрасГАУ*. 2015; 8: 75-80. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24120779>.
59. Беховых Ю.В. Влияние мульчирования на изменение гидротермических условий в пахотном слое чернозёма выщелоченного. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2020; 2 (184): 12-19. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42600764>.

## References

1. Salimova G., Ableeva A., Lubova T., Sharafutdinov A., Araslanbaev I. Multidimensional modeling of the economy of forest management and reforestation. *Ecological Modelling*. 2022; Vol. 472. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.110098>.
2. Donato D.C., Halofsky J.S., Churchill D.J., Haugo R.D., C. Cansler A., Smith A., Harvey B.J. Does large area burned mean a bad fire year? Comparing contemporary wildfire years to historical fire regimes informs the restoration task in fire-dependent forests. *Forest Ecology and Management*. 2023; Volume 546. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121372>. Access mode: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112723006060>.
3. Manukovsky A.Yu., Makarova Yu.A. Research on the restoration of forest areas affected by fires. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*. 2018; vol. 6; 3 (39): 87-91. Access mode: <https://elibrary.ru/ypclcx>.
4. Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G. Climatic changes and forest fires in Russia. *Forest science*. 2013; 5: 50-61. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20370655>.
5. Chuchalina A.A., Sannikova N.S. The influence of grass-roots fires on the renewal of coniferous species in the cranberry-blueberry-zelenomoshny pine forest. *Proceedings of the Orenburg State Agrarian University*. 2013; 3 (41): 13-16. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19425397>.
6. Sokolova G.G. The influence of agricultural bollards on the grass cover of birch forests of the Altai Territory. *Proceedings of the Altai State University*. 2014; 3-1 (83): 84-88. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21741785>.
7. Kazantseva M. N., Mukhamadieva R. R. The initial stage of restoration of vegetation cover on burning lichen pine forests in the southern part of the Tyumen region. *Actual problems of the forest complex*. 2023; 64: 196-200. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54795587>.
8. Buryak L. V., Kalenskaya O. P. The influence of fires on the formation of plantations in the Lower Angara region. *Monograph*. 2020; 140 p. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13500452>.
9. Sirolli H., Torrella S.A. The role of secondary forest in the survival and growth of native species: Tree planting field experiment in the delta of the Paraná River (Argentina). *Forest Ecology and Management*. 2023; Volume 546. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121329>. Access mode: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112723005637>.
10. Zhelyuk V. O., Ivanisova N. V. Natural renewal of the forest stand after grass-roots fires in the Rostov region. *Timiryazev Biological Journal*. 2023; 1: 68-72. Access mode: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54758296>.
11. Gryazkin A.V., Gavrilova O.I., Chen T., Semenova E.I. Structural features of forest phytocenoses formed on rock formations after a fire. *Forest Bulletin. Forestry Bulletin*. 2023; 27; 3: 18-25. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53944397>.
12. Rogozin M.V., Golikov A.M. The genetic aspect of forest restoration in burning areas. In the collection: *Problems of sustainable forest management in Siberia and the Far East. Materials of the All-Russian conference with international participation dedicated to the 75th anniversary of the formation of the Far Eastern Scientific Research Institute of Forestry*. 2014; 335-339. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53812083>.
13. Churchill D.J., Jeronimo S.M.A., Hessburg P.F., Cansler C.A., Povak N.A., Kane V.R., Lutz J.A., Larson A.J. Post-fire landscape evaluations in Eastern Washington, USA: Assessing the work of contemporary wildfires. *Forest Ecology and Management*. 2022; Volume 504. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119796>. Access mode: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112721008872>.
14. Šebesta J, Rogers P.C., Maděra P., Koutecký T., Dufour S., Řepka R. Long-term effects of mechanical site preparation on understorey plant communities in lowland floodplain forests. *Forest Ecology and Management*. 2021; Vol. 480: DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118651>.
15. Petrov A.S., Vinkovskaya O.P. The state of reforestation in the Kachugsky forestry of the Irkutsk region. *Bulletin of the IrGSHA*. 2023; 116:110-123. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53979667>.



16. Castro J., Leverkus A.B. Effect of Herbaceous Layer Interference on the Post-Fire Regeneration of a Serotinous Pine (*Pinus pinaster* Aiton) across Two Seedling Ages. *Forests*. 2019; Vol. 10. Issue 1: 74. DOI: <http://doi.org/10.3390/f10010074>.
17. Fisher R.F., Fox T.R., Harrison R.B., Terry T. Forest soils education and research: Trends, needs, and wild ideas. *Forest Ecology and Management*. 2005; Vol. 220 (1-3): 1-16. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.001>.
18. Atutova Zh.V. Post-fire restoration of pine forests in the Badary area, Tunkinskiy national park, Russia. *Nature Conservation Research*. 2023; 8; 2: 22-32. DOI: 10.24189/ncr.2023.010.
19. González-Díaz P., Jump A.S., Perry A., Wachowiak W., Cavers S., Lapshina E. Ecology and management history drive spatial genetic structure in Scots pine. *Forest Ecology and Management*. 2017; Vol. 400: 68-76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.05.035>.
20. North M.P., Latimer A.M., Welch K.R., Young D.J.N., Buckley T.N., Vice H., Stevens J.T., York R.A., Axel-son J.N., Shive K.L., Tubbesing C.L., Werner C.M., Wyrsh P., Greene D.F., Coppoletta M., Knapp E.E., Restaino C.M., Tompkins R.E., Estes B.L., Hager R.N. et al. Tamm Review: Reforestation for resilience in dry western U.S. forests. *Forest Ecology and Management*. 2019; Vol. 432: 209-224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.09.007>.
21. Prokushkin S.G., Zyryanova O.A. On the influence of Gmelin larch trees on the post-fire formation of forest phytocenosis in the cryolithozone of Central Siberia. *Siberian Ecological Journal*. 2013; 20; 5: 645-652. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20210731>.
22. Schwartz E.A., Starikov I.V., Kharlamov V.S., Yaroshenko A.Yu., Shmatkov N.M., Kobayakov A.V., Ptichnikov A.V., Lukovtsev F.Yu., Tyuleneva O.V., Golunov R.Yu., Shchegolev A.A. A new look at the development of the forest complex: Part 3 The fundamental foundations of the new forest. Use and protection of natural resources in Russia. 2021; 1 (165): 30-39. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45670893>.
23. Juan-Ovejero R., Molinas-González C.R., Leverkus A.B., Martín Peinado F. J., Castro J. Decadal effect of post-fire management treatments on soil carbon and nutrient concentrations in a burnt Mediterranean forest. *Forest Ecology and Management*. 2021; Vol. 498. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119570>.
24. Gómez-Sánchez M.E., Navidi M., Ortega R. (et al.) Medium-term associations of soil properties and plant diversity in a semi-arid pine forest after post-wildfire management. *Forest Ecology and Management*. 2023; Vol-ume 545. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121163>. Access mode: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112723003973>.
25. Boyko T.A., Napalkova Yu.A. The impact of fires on natural regeneration in the territory of the Krasnokamsky district forestry of the Zakamsky forestry. In the collection: Materials of the I nation. conf. on the results of scientific and industrial work of teachers and students in the field of landscape architecture and forestry. Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov. 2019; 37-42. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38073788>.
26. Ostroshenko V.Yu. Prolonged effect of growth stimulants on the cultivation of planting material of Korean spruce *Picea koraiensis* Nakai. *Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Agronomy and animal husbandry*. 2023; 18; 3: 309-319. Access mode: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54661938>.
27. Stevens J.T., Haffey C.M., Coop J.D. (et al.) Tamm Review: Postfire landscape management in frequent-fire conifer forests of the southwestern United States. *Forest Ecology and Management*. 2021; Vol. 502. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119678>.
28. Matallana R.G., Lucas-Borja M.E., Gómez-Sánchez M.E., Uddin S.M.M., Zema D.A. Post-fire restoration effectiveness using two soil preparation techniques and different shrubs species in pine forests of South-Eastern Spain. *Ecological Engineering*. 2022; Vol. 178: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106579>.
29. Bohlman G.N., North M., Safford H.D. Shrub removal in reforested post-fire areas increases native plant species richness. *Forest Ecology and Management*. 2016; Vol. 374: 195-210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.05.008>.

30. Lind B.M., North M.P., Maloney P.E., Eckert A.J. Effect of fire and thinning on fine-scale genetic structure and gene flow in fire-suppressed populations of sugar pine (*Pinus lambertiana* Dougl.). *Forest Ecology and Management*. 2019; Vol. 447: 115-129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.04.033>.
31. Steckel M., Heym M., Wolff B., Reventlow D.O.J., Pretzsch H. Transgressive overyielding in mixed compared with monospecific Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and oak (*Quercus robur* L., *Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) stands – Productivity gains increase with annual water supply. *Forest Ecology and Management*. 2019; Vo. 439: 81-96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.038>.
32. Prokazin N.E., Rodin S.A., Kazakov V.I., Lobanova E.N., Kazakov I.V. Improvement of technologies for growing planting material and reforestation on mountain ranges. *Forestry information*. 2019; 3: 38-47. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39263392>.
33. Recommendations on the planning and design of the reforestation fund in areas affected by forest fires and windfalls. Pushkino: VNIILM. 2019; 36. Access mode: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43825305>.
34. Levin G.D. Classical theory of analysis and synthesis. *Philosophy of science and technology*. 2020; Vol. 25; 2: 103-115. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44526604>.
35. Goncharov P. E., Popikov P. I., Ponomarev S. V., Shabanov M. L., Menyailov K. A. Improving the technological complex of technical means for reforestation in the burnt forests in the Central Black Earth region // *Forestry Journal*. 2013. No. 1 (9). Pp. 116-126. Access mode: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20164097>.
36. Chukarina A.V. Technologies for reforestation of pine forests in the conditions of the steppe region of the Don (on the example of the Rostov region) // *Current problems of the forest complex*. 2013. No. 35. Pp. 100-103. Access mode: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22574341>.
37. Castro J. Postfire Burnt-Wood Management Affects Plant Damage by Ungulate Herbivores. *International Journal of Forestry Research*. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/965461>.
38. Leverkus A., Lorite J., Navarro F., Sánchez-Cañete E., Castro J. Post-fire salvage logging alters species composition and reduces cover, richness, and diversity in Mediterranean plant communities. *Journal of environmental management*. 2014. Vol. 133. pp. 323-331. DOI: [doi:10.1016/j.jenvman.2013.12.014](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.014).
39. Prokazin N. E., Bartenev I. M., Kazakov V. I., Lobanova E. N. Features of the development and reforestation of burnt forests in the forest-steppe zone // *Forestry Journal*. 2015. No. 1 (17). Pp. 85-97. Access mode: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23576045>.
40. Tyrchenkova I.V. Features of reforestation in clearings and burnt areas in the Somovsky forestry of the Voronezh region // *Forestry Journal*. 2017. No. 3 (27). Pp. 157-166. Access mode: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30468610>.
41. Koba V.P. Features of restoration of Crimean pine stands in the post-pyrogenic period // *Ecosystems*. 2017. No. 11 (41). Pp. 10-13. Access mode: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30784158>.
42. Prokazin N. E., Bartenev I. M., Kazakov V. I., Lobanova E. N. Features of the growth of pine seedlings during reforestation of burnt forests in the forest-steppe zone // *Forestry Journal*. 2017. No. 2 (26). Pp. 91-96. Access mode: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29825788>.
43. Wittenberg L., Keesstra S., Tessler N. Post-fire management treatment effects on soil properties and burned area restoration in a wildland-urban interface, Haifa Fire case study. *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 716. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2019.135190](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135190).
44. Mauri E., Pons P. *Handbook of good practices in post-wildfire management*. Universitat de Girona. 2019. 171 p. ISBN: 978-84-8458-564-0.
45. Gyninova A. B., Ubugunov L. L., Kulikov A. A., Gyninova B. D., Gonchikov B. N., Badmaev N. B., Sympilova D. P. Post-fire evolution of forest ecosystems on sandy terraces of the South-Eastern Baikal region // *Siberian ecological journal*. 2020. T. 27. No. 1. P. 13-25. Access mode: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42347250>.

46. Fernández C., Fontúrbel T., Vega J.A. Cumulative effects of salvage logging and slash removal on erosion, soil functioning indicators and vegetation in a severely burned area in NW Spain. *Geoderma*. 2021; Vol. 393. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115004>.
47. Andrus R., Droske C., Franz M., Hudak AT., Leigh L., Lewis S., Morgan P., Robichaud P., Meddens A. Spatial and temporal drivers of post-fire tree establishment and height growth in a managed forest landscape. *Fire Ecology*. 2022. DOI: 18. 10.1186/s42408-022-00153-4.
48. Marcos E., Huerta S., Fernández-García V., Prieto I., Pinto P. P., Ansola G., Sáenz de Miera L., Calvo L. Mulching treatments favour the recovery of ecosystem multifunctionality after a large wildfire in Northwest Spain. 2022. Pp. 1234-1239. DOI: 10.14195/978-989-26-2298-9\_187.
49. Prior L., Nichols S., Williamson G., Bowman D. Post-fire restoration of Sphagnum bogs in the Tasmanian Wilderness World Heritage Area, Australia. *Restoration Ecology*. 2022. Vol. 31. DOI: 31. 10.1111/rec.13797.
50. Shirmin Yu. A., Shirmin A. Yu., Denisov S. A., Voldaev M. N., Sharnin I. V. Development of burnt areas damaged by ground fire with a machine system “harvester + forwarder” // *Bulletin of the Volga State Technological University*. Series: Forest. Ecology. Nature management. 2022. No. 2 (54). pp. 55-63. Access mode: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49208675>.
51. Lingua E., Marques G., Marchi N., Garbarino M., Marangon D., Tacaliti F., Marzano R. Post-Fire Restoration and Deadwood Management: Microsite Dynamics and Their Impact on Natural Regeneration. *Forests*. 2023. Vol. 14. DOI: 10.3390/f14091820.
52. Odnoralov G.A., Tikhonova E.N., Golyadkina I.V., Malinina T.A. Assessment of the biological productivity of the forest environment in conditions of urbanization (on the example of the Voronezh upland oak grove). *News of higher educational institutions. Forest magazine*. 2020; 2 (374): 60-72. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42654444>.
53. Rodin S.A., Prokazin N.E., Kazakov V.I., Lobanova E.N., Pentelkina N.V., Rumyantseva S.A., Cheplyansky I.Ya. Recommendations for planning and designing a reforestation fund in areas affected by forest fires and windfalls. 2019: 36. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43825305>.
54. Malyukov S.V., Panyavina E.A., Aksenov A.A. Analysis of designs of mulchers and rotovators. *Forestry and Technical journal*. 2019; 1 (33): 159-167. Access mode: <https://elibrary.ru/zfeegt>.
55. Ivashnev M.V. Scientific foundations of improving machines for removing woody and shrubby vegetation with continuous movement of the base tractor : dis. ... Doctor of Technical Sciences : 05.21.01. 2020; 316. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54471861>.
56. Löf M., Dey D.C., Navarro R.M., Jacobs D.F. Mechanical site preparation for forest restoration. *New Forests*. 2012; Vol. 43 (5-6): 825-848. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11056-012-9332-x>.
57. Curran M.P., Murray M.P. Soil disturbance, amelioration and rehabilitation affect forest growth, health, soil carbon and chemistry on five long-term soil productivity (LTSP) sites in southeastern British Columbia. *Forest Ecology and Management*. 2023; Vol. 546. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121362>. Access mode: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112723005960>.
58. Tarasov P.A., Baksheeva E.O., Ivanov V.A. Studies of the effect of continuous cutting mulching on soil temperature. *Bulletin of KrasGAU*. 2015; 8: 75-80. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24120779>.
59. Behovykh Yu.V. The effect of mulching on changes in hydrothermal conditions in the arable layer of leached chernozem. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*. 2020; 2 (184): 12-19. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42600764>.

## Сведения об авторах

*Калинин Роман Константинович* – преподаватель кафедры безопасности жизнедеятельности и здоровьесберегающих технологий, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», просп. Ленина, 33, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Российская Федерация, 185910, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5863-0564>, e-mail: [komers.for@gmail.com](mailto:komers.for@gmail.com) e-mail.

✉ *Ивашнев Михаил Валерьевич* – доктор техн. наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности и здоровьесберегающих технологий, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», просп. Ленина, 33, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Российская Федерация, 185910, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7780-9922>, e-mail: [ivashnev.mv@yandex.ru](mailto:ivashnev.mv@yandex.ru).

*Васильев Алексей Сергеевич* – кандидат техн. наук, доцент кафедры технологии и организации лесного комплекса, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», просп. Ленина, 33, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Российская Федерация, 185910, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2349-5600>, e-mail: [alvas@petsu.ru](mailto:alvas@petsu.ru).

*Суханов Юрий Владимирович* – кандидат техн. наук, доцент кафедры технологии и организации лесного комплекса, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», просп. Ленина, 33, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Российская Федерация, 185910, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1517-5538>, e-mail: [yurii\\_ptz@bk.ru](mailto:yurii_ptz@bk.ru).

## Information about the authors

*Roman K. Kalinin* – Lecturer of the Department of Life Safety and Health-saving Technologies, Petrozavodsk State University, ave. Lenin, 33, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russian Federation, 185910, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5863-0564>, e-mail: [komers.for@gmail.com](mailto:komers.for@gmail.com).

✉ *Mikhail V. Ivashnev* – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Life Safety and Health-saving Technologies, Petrozavodsk State University, ave. Lenin, 33, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russian Federation, 185910, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7780-9922>, e-mail: [ivashnev.mv@yandex.ru](mailto:ivashnev.mv@yandex.ru).

*Alexey S. Vasiliev* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology and Organization of the Forest Complex, Petrozavodsk State University, ave. Lenin, 33, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russian Federation, 185910, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2349-5600>, e-mail: [alvas@petsu.ru](mailto:alvas@petsu.ru).

*Yuri V. Sukhanov* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology and Organization of the Forest Complex, Petrozavodsk State University, ave. Lenin, 33, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russian Federation, 185910, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1517-5538>, e-mail: [yurii\\_ptz@bk.ru](mailto:yurii_ptz@bk.ru).

✉ – Для контактов/Corresponding author


Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/5>

УДК 630\*235.2



## Моделирование взаимодействия задних вырезных дисков лесного дискового плуга с почвой при работе на вырубках

Александр Г. Князев, ✉ [Knjazv-sasha@rambler.ru](mailto:Knjazv-sasha@rambler.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-5139-0374>

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

В работе приведен обзор исследований рабочих процессов дисковых рабочих органов технологических машин, обеспечивающих обработку почвы на разных стадиях ведения сельского и лесного хозяйства. Применяемые конструкции лесных дисковых почвообрабатывающих орудий, имеют существенные недостатки, заключающиеся в недостаточной заглубляемости дисков, из-за чего происходит обработка почвы недостаточного качества, а также высоких динамических нагрузок при встрече с различными препятствиями, которые снижают ресурс агрегата. Задачей представленного исследования является совершенствование рабочих процессов лесных дисковых плугов путем анализа свойств вырезных дисков с гидроприводом с целью увеличить их эффективность. Разработана математическая модель дискового рабочего органа с гидроприводом задних дисков с вырезами для полосной обработки почвы в лесных, корненасыщенных условиях. Выявлены максимальные показатели давлений рабочей жидкости в гидросистема. При изменении угла атаки сферических дисков от 0 до 30° давление рабочей жидкости снижается на 23 %. При дальнейшем увеличении угла атаки до 45° давление рабочей жидкости возрастает на 15 %, что говорит о нелинейной зависимости этих параметров. Максимальное тяговое сопротивление возрастает при изменении угла атаки сферического диска от 0 до 30° и увеличивается на 29 %, а после изменения угла атаки на 45° поднимается на 11 %. По выведенным формулам можно приблизительно определить кинематические и динамические параметры дисковых рабочих органов, имеющих вырезы на режущей поверхности диска.

**Ключевые слова:** дисковый плуг, гидропривод, вырубки, диск с вырезами, рабочий процесс, математическая модель

**Финансирование:** данное исследование не получало внешнего финансирования.

**Благодарности:** автор выражает благодарность научному руководителю профессору, д-ру техн. наук Драпалюку М.В., а также профессору кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ВГЛТУ д-ру техн. наук Попикову П.И. за консультации при подготовке материала.

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Князев, А. Г. Моделирование взаимодействия задних вырезных дисков лесного дискового плуга с почвой при работе на вырубках / А. Г. Князев // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 14. – № 1 (53). – С. 81–94. – Библиогр.: с. 90–94 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/5>.

*Поступила 27.11.2023. Пересмотрена 27.12.2023. Принята 16.01.2024. Опубликовано онлайн 20.03.2024.*

Article

## Modeling the interaction of the rear cut-out discs of a forest disc plow with the soil when working in clearings

Alexander G. Knyazev, ✉ Knjazv-sasha@rambler.ru  <https://orcid.org/0000-0002-5139-0374>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

### Abstract

The paper provides an overview of studies of the working processes of disk working bodies of technological machines that provide soil cultivation at different stages of agriculture and forestry. The used designs of forest disk tillage implement have significant disadvantages, namely, insufficient depth of the disks, which results in soil cultivation of insufficient quality, as well as high dynamic loads when encountering various obstacles, which reduce the resource of the unit. The objective of the presented research is to improve the working processes of forestry disc plows by analyzing the properties of hydraulically driven cut-out discs in order to increase their efficiency. A mathematical model of a disk working body with hydraulically driven rear discs with cutouts for strip tillage in forest, root-saturated conditions has been developed. The maximum pressure values of the working fluid in the hydraulic system have been identified. When the angle of attack of the spherical disks changes from 0 to 30°, the pressure of the working fluid decreases by 23%. With a further increase in the angle of attack to 45°, the pressure of the working fluid increases by 15%, which indicates a nonlinear dependence of these parameters. The maximum traction resistance increases when the angle of attack of the spherical disk changes from 0 to 30° and increases by 29%, and after changing the angle of attack to 45° it increases by 11%. Using the derived formulas, it is possible to approximately determine the kinematic and dynamic parameters of disk working bodies that have cutouts on the cutting surface of the disk.

**Keywords:** *disk plow, hydraulic drive, cutting, disk with cutouts, work process, mathematical model*

**Funding:** this research received no external funding.

**Acknowledgments:** the author would like to express their gratitude to their scientific supervisor, Professor M.V. Drapalyuk, as well as to Professor P.I. Popikov, Doctor of Technical Science, of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design at the Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, for their consultations during the preparation of this manuscript.

**Conflict of interest:** the author declares no conflict of interest.

**For citation:** Knyazev A. G. (2024). Modeling the interaction of the rear cut-out discs of a forest disc plow with the soil when working in clearings. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 1 (53), pp. 81-94 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/5>.

**Received** 27.11.2023. **Revised** 27.12.2023. **Accepted** 16.01.2024. **Published online** 20.03.2024.

### Введение

При создании новых механизмов для лесного хозяйства, таких как дисковые плуги, необходимо учитывать ряд критически важных показателей, чтобы обеспечить их эффективную работу на стадии производства. Одним из способов достижения мак-

симальной работоспособности такого орудия является использование математической модели, которая описывает процессы, возникающие при его работе. Она позволяет учесть различные факторы, влияющие на работу орудия, и оптимизировать его производительность. Модель может учитывать такие

параметры, как глубина обработки, скорость движения плуга, угол атаки дисков и другие важные характеристики. Одним из преимуществ математической модели является возможность изменения входных данных и получения оптимальных показателей работоспособности дискового плуга. Таким образом, применение математической модели при разработке нового механизма дисковых плугов с принудительным вращением рабочих органов от гидромотора является необходимым шагом для достижения оптимальных показателей работоспособности орудия.

В научных статьях Д.С. Раабе, С.В. Малюкова, В.А. Великанова обоснована актуальность практического применения в сельском и лесном хозяйствах рабочих органов, оснащенных сферическими дисками [1-3]. Особенно эффективно зарекомендовали себя в комбинированном исполнении с другими рабочими органами, что повышает производительность.

Исследования Е.В. Припорова (2019) [4], проводимые по повышению качества обработки почвы дисковыми рабочими органами, выявили зависимости коэффициента измельчения междискового пространства от угла атаки при использовании орудий батарейного типа.

В результатах исследований С.Н. Долматова и Н.В. Сухенко (2022) [5] были выявлены определённые закономерности, влияющие на кинематические характеристики в процессе обработки лесных почв при использовании дисковых рыхлительных орудий. Определен характер движения пласта почвы по рабочей поверхности дискового рыхлителя. В результате параметры рабочего органа: геометрический анализ процесса образования борозд при обработке почвы дисковым рыхлителем, предлагаются следующие профили борозды с углами наклона  $45^\circ$ ; угол наклона лемешной части рабочей лопатки ножа дискового рабочего органа должен уменьшаться от носка ножа к его тыльной поверхности.

В работе С.В. Зимарина и И.В. Четвериковой (2021) [6] рассмотрены процессы схода почвопласта с поверхности диска. Определены зависимости, оказывающие влияние на параметры дискового корпуса плуга и смещение частицы от края борозды. При изменении величины повышения почвенного пласта

по плоскости диска, не допуская их начала движения схода при угле  $\phi$  больше  $100^\circ$ , будет предотвращаться падение земли в борозду. Полученные уравнения позволяют определять эксплуатационные характеристики рабочего органа. Дисковые рабочие органы получили широкое распространение при использовании их на нераскорчёванных вырубках. Для того чтобы предохранить рабочий орган от забивания почвой и другими материалами, их корпуса соединяются с рамой агрегата по отдельности.

Для ускорения процесса исследования применяют системы автоматизированного проектирования. М.Н. Лысыч (2020) [7] выявил воздействие угла атаки рабочего органа на силовые параметры, такие как силу тяги, тяговую мощность и т.п.

В работах В.П. Горобей (2019) и К.С. Перфильевой (2022) [8, 15] рассмотрено тяговое сопротивление дискового рабочего органа в зависимости от угла атаки и высоты зубцов при зубчатом дисковом ноже. Они выявили, что если угол атаки больше  $35^\circ$ , то обработка почвы будет значительно лучше, чем при угле атаки  $15^\circ$ . При угле атаки до  $25^\circ$  тяговое сопротивление увеличивается по прямолинейной зависимости, а при дальнейшем увеличении по криволинейной зависимости с максимальным значением при угле атаки  $35^\circ$ . При использовании зубчатых дисков с увеличением глубины зубьев диска тяговое сопротивление уменьшается по обратной зависимости. Так же они выявили, что оптимальной высотой зуба является высота, равная 3 см. Для того чтобы еще снизить энергозатраты авторы предлагают использовать такой диск, как режущий нож, установленный перед основными рыхлительными рабочими органами.

Проанализировали перемещение грунта по предплужнику и кинематический анализ дискового рабочего органа В.И. Коновалов и соавторы (2023); И.С. Крук (2022) [9, 12] Автор выявил параметры движения пласта с учетом конструктивных, технологических свойств предплужника и физико-механических свойств почвы. На расстояние отбрасывания частиц грунта от предплужника большее значение оказывает угол крена диска и угол атаки, соответственно, чем выше значения этих параметров, тем на большее расстояние отбрасывается грунт. Вектор абсолютной скорости свободной точки при

любом угле поворота диска ускоряется за счет увеличения поступательной линейной скорости диска, при этом ускоренный вектор становится наиболее активным при углах поворота  $\pi/2$  до  $2\pi/3$ . Участок внутренней рабочей поверхности, с которого удаляется грунт, расположен в том же месте. Проанализировав эти зависимости пришли к выводу, что для обеспечения качественной вспашки при любом состоянии почвы можно еще на стадии проектирования агрегата, а также за счет обоснования оптимальных параметров установки дисковых предплужников на раме плуга.

В работе Князева А.Г. и др. (2020) представлена математическая модель взаимодействия рабочих органов грунтометателя с грунтом [10]. Эта математическая модель позволяет исследовать эффективность машины на основе компьютерных экспериментов. Цель данного исследования заключалась в теоретическом анализе процессов формирования почвенного потока, его передвижения в воздухе и его воздействия на распространение лесных пожаров. Для достижения этой цели была разработана специальная модель, которая позволяет изучить влияние основных параметров рабочих органов на производительность, качество и энергопотребление определенного типа грунтомета. В рамках данного исследования также была разработана компьютерная программа, которая позволяет провести подробный анализ указанных параметров и установить их влияние на эксплуатационные характеристики этого грунтомета. Оптимальную скорость шнека можно рекомендовать в диапазоне  $3,0-3,5 \text{ с}^{-1}$ . В этом диапазоне в грунтовом потоке содержится растительных остатков менее 15%, производительность составляет более 40 кг/с, средняя дальность метания грунта более 11 м, потребляемая мощность менее 11 кВт.

Работа С.В. Зимарина (2018) [11], проводимая по исследованию дискатора, позволила определить оптимальный диапазон отношений радиуса отверстия сферического диска к его наружному радиусу, который составил 0,65/0,8. При увеличении угла атаки и диаметра диска увеличивается радиус кривизны отвала.

Проведенные экспериментальные исследования позволили получить выражение, которое помогает сформировать идеальные параметры корпуса дискатора. Исследование также показало, как от конструктивно – технологических характеристик орудия зависит угол неустойчивого равновесия пласта. Это позволяет более точно настроить орудие и достичь требуемых результатов при обработке почвы. Были выведены формулы С. Г. Рудневым и соавторами (2021) [13], определяющие связь гребнистости дна борозды и поперечного сечения пласта с параметрами рабочего органа дискового плуга. Установил, что гребнистость профиля дна борозды не зависит от глубины вспашки, а определяется радиусом диска, расстановкой смежных дисков, углами постановки дисков.

П.И. Попиков и соавторы (2021) [14] представили результаты моделирования гидропривода во время использования шнекового лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя. Получив необходимые характеристики и данные при работе агрегата на участке с препятствиями, они выявили, что при прохождении неровности высотой 0,1 м достигается максимальное среднее значение равное 1468,49 Н×м. при этом скорость вращения шнека составляла  $400 \text{ мин}^{-1}$ . Работоспособность гидропривода не нарушается за счет срабатывания предохранительного клапана.

Другим важным аспектом является оптимизация параметров циклического резания грунта. Применяя методику оптимизации, можно определить конкретные показатели параметров в процессе оборота ротора орудия. Для определения факторов, которые влияют на работу орудия такие как: масса сдвигаемого грунта, сила необходимая для смещения почвы активным рабочим органом и др., необходимо строить графики зависимости параметров резания грунта от угла поворота орудия.

López-Vázquez A. и соавторы (2019) [16] рассмотрели, как оказывает влияние на производительность и плотность почвообрабатывающих систем количество затраченной энергии при работе на песчаном грунте. Он выявил что экономия увеличивается примерно в 1,6 - 1,9 раз, при условии использования сеялки (CHDP) и безотвальной обработки почвы.



Сравнительный анализ математических моделей при планировании тягового усилия плуга дискового типа в условиях глинисто – суглинистого грунта провёл в своей работе Shafaei S. и др. (2018) [17]. Результаты моделирования подтвердили, что использование математической модели является эффективным инструментом для определения параметров и прогнозирования работоспособности орудия.

Несколько разновидностей сельскохозяйственных орудий исследовал S.Almaliki (2018) [18]. Используя методику, введенную Джорджем Э.П. Боксом и К.Б. Уилсоном, – методологию поверхности отклика – он рассчитывал тяговое усилие. После проведенных расчетов пришёл к выводу, что отвальный плуг требует самые большие усилия. Динамические характеристики моделей были удовлетворительными, тяговое усилие было предсказано с надёжностью около 95 %. Валидация была допустимой и подходящей.

Отличительной особенностью модели Н. Ю. Юдина и др. (2021) [19] является то, что она позволяет достаточно правильно выбрать типоразмер гидромоторов и рассчитать определенные значения давления в системе и скоростей исполнительных движений гидромоторов. Научная новизна авторского подхода заключается в том, что в результате решения задачи получена математическая модель, объединяющая три одновременно протекающих процесса: изменение давления в гидросистеме; перемещение поршней гидроцилиндров и ротора гидромотора, связанное с изменением давления; возникновение сил инерции, зависящих от ускорений, которые, в свою очередь, являются второй производной перемещения. На основе полученной модели был разработан алгоритм построения программного модуля, обеспечивающий верификацию этой модели. Полученные результаты были сопоставлены с экспериментальными, что позволило сделать вывод.

В итоге было выявлено, что для улучшения качества обработки почвы, необходимо использовать лесные почвообрабатывающие орудия дискового типа с комбинированными вырезными и сплошными дисками.

У большинства уже используемых конструкций лесных плугов, используемых на нераскорчеванных вырубках есть определенные недостатки. Задние диски не используются полностью и их заглубление недостаточное, а также при наезде на препятствие возникают высокие ударные нагрузки.

Задачей представленного исследования является совершенствование рабочих процессов лесных дисковых плугов путем анализа свойств вырезных дисков с гидроприводом с целью увеличить их эффективность.

### Материалы и методы

#### Предмет и объект исследования

Прототипом в представленном исследовании послужил дисковый плуг ПЛД-1,2, предназначенный для работ в лесных условиях (рис. 1), имеющий ряд недостатков. Предложена усовершенствованная конструкция за счет использования вырезных дисковых рабочих органов, оборудованных гидроприводом. Это позволит увеличить качество обработки почвы.

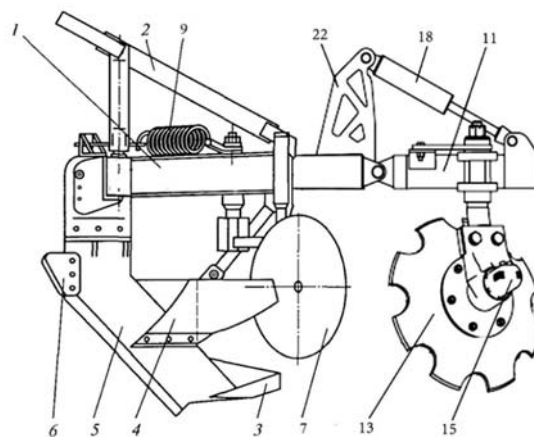


Рисунок 1. Лесной дисковый плуг: 1 – передняя рама; 2 – подвесное устройство; 3 – рыхлительная лапа; 4 – дерносор; 5 – черенковый нож; 6 – лобовик; 7 – передний дисковый корпус; 9 – предохранительная пружина; 11 – задняя рама; 13 – задний дисковый корпус; 15 – гидромотор; 18 – гидроцилиндр; 22 – стойка

Figure 1. Forest disk plow: 1 – front frame; 2 – hanging device; 3 – ripper paw; 4 – turf; 5 – cutting knife; 6 – windshield; 7 – front disk housing; 9 – safety spring; 11 – rear frame; 13 – rear disk housing; 15 – hydraulic motor; 18 – hydraulic cylinder; 22 – stand

Источник: Собственная композиция автора  
Source: Authors' own composition

Предметом исследования является взаимодействие сферических дисков, имеющих вырезы на режущей поверхности с почвой при принудительном вращении от гидромоторов.

Исходя из расчетной схемы заднего сферического диска, имеющего вырезы (рис. 2), была предложена математическая модель, имитирующая взаимодействия почвы с вырезным сферическим диском.

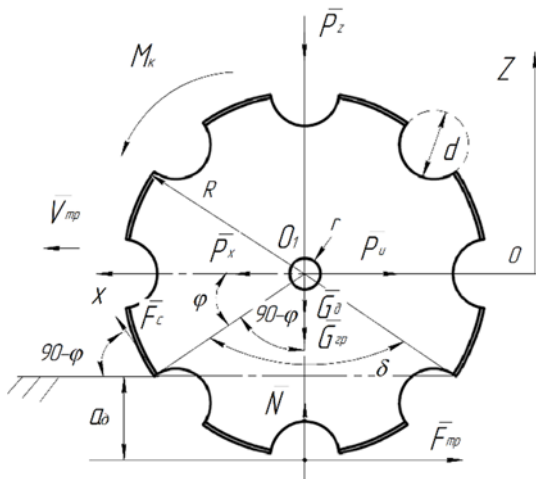


Рисунок 2. Расчетная схема вырезного сферического диска, функционирующего от гидромотора гидропривода трактора:

$G_d, G_{gr}$ -силы тяжести диска и почвы на диске,  $V_{mp}$ -скорость трактора,  $P_z$ - сила предохранителя,  $N$ -реакция поверхности почвы,  $F_{mp}$  - сила сопротивления перекачиванию диска,  $M_k$  - крутящий момент гидромотора,  $P_x$ - тяговая сила,  $P_u$ - сила инерции,  $F_c$  - сила сопротивления резанию

Figure 2. Design diagram of a cut-out spherical disk operating from a tractor hydraulic motor:

$G_d, G_{gr}$ - gravity force of the disk and soil on the disk,  $V_{tr}$  - tractor speed,  $P_z$  - force of the fuse spring,  $N$  - reaction of the soil surface,  $F_{tr}$  - resistance force to the disk rolling,  $M_k$  - torque of the hydraulic motor,  $P_x$  - traction force,  $P_i$  - inertia force,  $F_c$  - cutting resistance force

Источник: Собственные композиции автора

Source: Authors' own calculation

*Теоретические предпосылки*

Рабочий процесс дискового плуга в представленном исследовании описан в виде системы дифференциальных уравнений, содержащей в себе уравнение поступательного (1) движения и уравнение

вращательного (2) движения сферического диска. В этой системе дополнительно рассмотрено уравнение расхода рабочей жидкости в гидроприводе рабочего органа (3):

$$\left\{ \begin{aligned} (M_d + M_{gr}) \frac{d^2 x}{dt^2} &= P_x - [G_d + G_{gr} + P_z] f + \\ &+ 0,5k_{y\phi} \cdot \left[ R^2 \left( \frac{\pi \delta^0}{180^\circ} - \sin \delta^0 \right) - 1,5\pi \frac{d^2}{4} \right] \cdot \\ &\cdot \cos(90^\circ - \varphi); \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{aligned} I_{pr} \frac{d^2 \varphi}{dt^2} &= \frac{q_m}{2\pi} \cdot p - [G_d + G_{gr} + P_z] R f - \\ &- \left[ 0,5k_{y\phi} \cdot R^2 \left( \frac{\pi \delta^0}{180^\circ} - \sin \delta^0 \right) - 1,5\pi \frac{d^2}{4} \right] \cdot R; \end{aligned} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{aligned} q_n n_n = \frac{q_m}{\pi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} + a_y \cdot p + K_p \cdot \frac{dp}{dt} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где  $G_d, G_{gr}$  - силы тяжести диска и почвы, налипшей на диск, Н;

$I_{pr}$  - приведенный момент инерции к валу гидромотора, кг·м<sup>2</sup>;

$M_d, M_{gr}$  - масса диска и почвенного пласта на диске, кг;

$R$  - радиус диска, м;

$f$  - коэффициент трения скольжения;

$d$  - диаметр выреза диска;

$r$  - радиус ступицы, м;

$t$  - время, с;

$h$  - шаг интервала, с;

$t$  - время, с;

$b$  - ширина рабочей грани выреза на диске, м;

$\alpha$  - угол атаки сферического диска, рад;

$\delta$  - угол заглубления диска в почву;

$\varphi$  - угол поворота вала на диске, рад;

$\beta$  - угол заточки выреза на диске, град;

$p$  - давление рабочей жидкости в гидросистеме, Па;

$n_n$  - частота вращения насоса, с<sup>-1</sup>;

$a_y$  - коэффициент утечек рабочей жидкости, м<sup>3</sup>/(с·Па);

$q_n, q_m$  - рабочие объемы насоса и гидромотора, м<sup>3</sup>/об;

$\varphi_{тр}$  - угол трения почвы о поверхность сферического диска, град;

$K_{уд}$  - удельное сопротивление резанию сферического диска с вырезами;

$K_p$  - коэффициент податливости упругих элементов гидропривода, м<sup>5</sup>/(Н·с).

Рассматривается задача Коши на участках (4):

$$\begin{aligned} (M_d + M_{gr}) \frac{d^2 x}{dt^2} &= P_x - [G_d + G_{gr} + P_z] f + \\ &+ 0,5k_{y0} \cdot \left[ R^2 \left( \frac{\pi \delta^0}{180^0} - \sin \delta^0 \right) - 1,5\pi \frac{d^2}{4} \right] \cdot \\ &\cdot \cos(90^0 - \varphi); \\ I_{pr} \frac{d^2 \varphi}{dt^2} &= \frac{q_m}{2\pi} \cdot p - [G_d + G_{gr} + P_z - F_c \cos \varphi] Rf - \\ &- \left[ 0,5k_{y0} \cdot R^2 \left( \frac{\pi \delta^0}{180^0} - \sin \delta^0 \right) - 1,5\pi \frac{d^2}{4} \right] \cdot R; \end{aligned} \quad (4)$$

$$q_n n_n = \frac{q_m}{\pi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} + a_y \cdot p + K_p \cdot \frac{dp}{dt}$$

$$x(t_0) = x^0, x'(t_0) = x^1$$

$$\varphi(t_0) = \varphi^0, \varphi'(t_0) = \varphi^1$$

$$p(t_0) = p^0$$

Для решения поставленной задачи необходимо аппроксимировать производные конечными разностями, при этом отрезок  $[t_0; t_{end}]$  разобьём на  $n$  узловых точек  $t_i$  с шагом  $h$ :  $t_{i+1} = t_i + h$ ; следовательно, величина шага будет равняться  $h = (t_{end} - t_0) / n$ . Выбор шага производим так, чтобы уравнение  $h \neq K_p a_y^{-1}$  соблюдалась. В обозначениях,  $x_i = x(t_i)$ ,  $\varphi_i = \varphi(t_i)$ ,  $p_i = p(t_i)$  имеем (5):

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x}{dt^2} &\approx \frac{x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_i}{h^2}, \\ \frac{d\varphi}{dt} &\approx \frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{h}, \frac{d^2 \varphi}{dt^2} \approx \frac{\varphi_{i+2} - 2\varphi_{i+1} + \varphi_i}{h^2}, \quad (5) \\ \frac{dp}{dt} &\approx \frac{p_{i+1} - p_i}{h}. \end{aligned}$$

Тогда систему уравнений (5) можно записать таким образом (6), выделив значение  $\varphi_{i+2}$  в первом уравнении и по аналогии  $\varphi_{i+2}$  во втором и умножив каждое на  $h^2$  [20, 21]:

$$\begin{aligned} (M_d + M_{gr}) x_{i+2} &= 2(M_d + M_{gr}) x_{i+1} - \\ &- (M_d + M_{gr}) x_i + 2(M_d + M_{gr}) x_{i+1} - \\ &- (M_d + M_{gr}) x_i + h^2 P_x - h^2 (G_d + G_{gr} + P_z) f + \\ &+ h^2 0,5k_{y0} \cdot \left[ R^2 \left( \frac{\pi \delta^0}{180^0} - \sin \delta^0 \right) - 1,5\pi \frac{d^2}{4} \right] \cdot \\ &\cdot \cos(90^0 - \varphi); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{pr} \varphi_{i+2} &= 2I_{pr} \varphi_{i+1} - I_{pr} \varphi_i + h^2 \frac{q_m}{\pi} p_i - \\ &- h^2 \left[ 0,5k_{y0} \cdot R^2 \left( \frac{\pi \delta^0}{180^0} - \sin \delta^0 \right) - 1,5\pi \frac{d^2}{4} \right] \cdot \\ &\cdot R + h^2 Rf \cdot (G_d + G_{gr} + P_z - F_c \cos \varphi); \end{aligned}$$

(6)

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{q_m}{\pi} \varphi_{i+1} - \frac{q_m}{\pi} \varphi_i + K_p p_{i+1} + \\ &+ (ha_y - K_p) p_i - hq_n n_n. \end{aligned}$$

Рассмотрим второе и третье соотношения системы отдельно и запишем их в векторной форме (7-11):

$$Ay_{i+2} = By_{i+1} + F_i, \quad (7)$$

с операторами  $A, B: R^2 \rightarrow R^2$

$$A = \begin{pmatrix} l_{pr} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 2l_{pr} & 0 \\ \frac{q_m}{\pi} & K_p \end{pmatrix}, \quad (8)$$

и вектор-последовательностями

$$y_i = \begin{pmatrix} \varphi_i \\ p_i \end{pmatrix}, F_i = \begin{pmatrix} F_i^{(1)} \\ F_i^{(2)} \end{pmatrix} \quad (9)$$

в обозначениях:

$$\begin{aligned} F_i^{(1)} &= -l_{pr} \varphi_i + h^2 \frac{q_m}{2\pi} p_i - h^2 \cdot \\ &\cdot \left[ 0,5k_{y0} \cdot R^2 \left( \frac{\pi \delta^0}{180^0} - \sin \delta^0 \right) - 1,5\pi \frac{d^2}{4} \right] \cdot \\ &\cdot R + h^2 Rf (G_d + G_{gr} + P_z - F_c \cos \varphi_i), \end{aligned} \quad (10)$$

$$F_i^{(2)} = \frac{-q_m}{\pi} \varphi_i + (ha_y - K_p) p_i - hq_n n_n. \quad (11)$$

#### Дизайн эксперимента

В результате решений дифференциальных уравнений процесса работы лесного дискового орудия выведены и решены конечные формулы кинематических и динамических параметров диска с вырезами на режущей поверхности: ускорение поступательного движения сферического диска с вырезами,

поступательной скорости движения вдоль оси  $x$ , угла поворота сферического диска с вырезами, углового ускорения, давления рабочей жидкости в гидросистеме рабочего органа, силы тягового сопротивления при его взаимодействии с грунтом. При использовании программного обеспечения MS Excel визуализированы осциллограммы кинематических и динамических параметров рабочего процесса сферического диска с вырезами.

Проведя анализ этих осциллограмм сделаны общие графики зависимостей максимальных давлений в гидроприводе и тяговые усилия сферического диска с вырезами от угла атаки.

*Анализ данных*

На основании результатов компьютерного эксперимента с помощью программы MS Excel построили осциллограммы кинематических и динамических параметров работы дискового корпуса плуга, имеющего вырезы на режущей поверхности диска и принудительно вращающегося от гидромотора, с указанием уравнения регрессии коэффициента достоверности аппроксимации  $R^2$ .

**Результаты**

Решение  $x_i$  вдоль оси  $OX$  т.е. прямолинейного поступательного движения сферического диска, имеющего вырезы с начальными значениями  $x_0 = x^0$  и  $x_1$ , определяемым формулой (12), равно:

$$x_i = x^0 + x^1 i h + \frac{h^2}{M_d + M_{gr}} \sum_{l=0}^{i-2} (i-l-1) \xi_l, \quad (12)$$

$i = 2, 3, \dots$

где  $x_0 = x^0$ ,  $x_1 = x^0 + x^1 h$ .

$$\xi_l = P_x - (G_d + G_{gr} + P_z) f + 0,5k_{y\delta} \cdot \left[ R^2 \left( \frac{\pi \delta^0}{180^0} - \sin \delta^0 \right) - 1,5\pi \frac{d^2}{4} \right] \cdot \cos(90 - \varphi); \quad (13)$$

Поступательная скорость движения сферического диска с вырезами в направлении оси  $ox$  можно определить по формуле (14):

$$\frac{dx}{dt}(t_i) \approx x^1 + \frac{h}{M_d + M_{gr}} \sum_{l=0}^{i-1} \xi_l, \quad (14)$$

Тогда ускорение движения сферического диска вдоль оси  $ox$  находится по формуле (15):

$$\frac{d^2x}{dt^2}(t_i) \approx \frac{1}{M_d + M_{gr}} \sum_{l=0}^{i-1} \xi_l, \quad (15)$$

Формулы (16-18) для нахождения величины давления рабочей жидкости в гидроприводе сферического диска  $p = p(t_i)$ :

$$p_i = p^0 (1 - hK_p^{-1} a_y)^i - \eta_{i-1} + \sum_{l=0}^{i-1} (1 - hK_p^{-1} a_y)^{i-1-l} \eta_l, \quad (16)$$

$i = 2, 3, \dots,$

где  $p_0 = p^0$ ,

$$p_1 = p^0 (1 - hK_p^{-1} a_y) - K_p^{-1} \frac{q_m}{\pi} \varphi^1 h + hK_p^{-1} q_n n_n, \quad (17)$$

$$\eta_l = (1 - hK_p^{-1} a_y)^{-1} \left( -K_p^{-1} \frac{q_m}{\pi} \varphi_{l+1} + hK_p^{-1} q_n n_n \right) \quad (18)$$

Конечные формулы (19) для угла поворота вырезного сферического диска  $\varphi = \varphi(t_i)$ :

$$\varphi_{i+2} = 2\varphi_{i+1} - \varphi_i + h^2 I_{pr}^{-1} \frac{q_m}{2\pi} p_i - h^2 I_{pr}^{-1} 0,5k_{y\delta} \cdot \left[ R^2 \left( \frac{\pi \delta^0}{180^0} - \sin \delta^0 \right) - 1,5\pi \frac{d^2}{4} \right] \cdot R + + h^2 R f (G_d + G_{gr} + P_z - F_c \cos \varphi_i); \quad (19)$$

$i = 0, 1, 2, \dots,$

где  $\varphi_0 = \varphi^0$ ,  $\varphi_1 = \varphi^0 + \varphi^1 h$ .

в связи с этим, решение  $x(t)$ ,  $\varphi(t)$ ,  $p(t)$  задач вычисляется приблизительно в виде показателей  $x_i$ ,  $\varphi_i$ ,  $p_i$  в каждой из точек  $t_i$ .

В процессе вычислительного эксперимента были получены осциллограммы изменения давления для различных углов атаки. После обработки осциллограмм выбраны максимальные давления в гидроприводе диска с вырезами и построена их зависимость от углов атаки, которая усреднена линией тренда (рис. 3).

Проведя расшифровку представленного графика (рис. 3) можно сделать выводы о изменениях давления рабочей жидкости в гидросистеме. При увеличении угла атаки от 0 до 30° показатели максимального давления рабочей жидкости снижаются на значения в диапазоне от 17 до 13 МПа. Регрессионный анализ и уравнение прогнозирования показывают ( $R^2 = 0.9295$ ;  $y = 0,0063x^2 - 0,349x + 18,395$ ). При увеличении угла атаки от 30 до 45° давление

поднимается до 15 МПа, что говорит о повышении нагрузки на гидропривод.

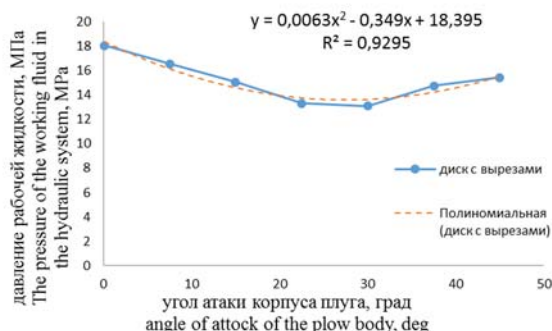


Рисунок 3. Общий график давления в гидроприводе диска

Figure 3. General graph of pressure in the hydraulic drive of the disk

Источник: Собственная композиция автора  
Source: Authors' own calculation

В процессе обработки полученных осциллограмм выведен общий график (рис. 4) максимальных показателей тяговых усилий от угла атаки дисков с вырезами на режущей поверхности, статистически усредненная линией тренда.

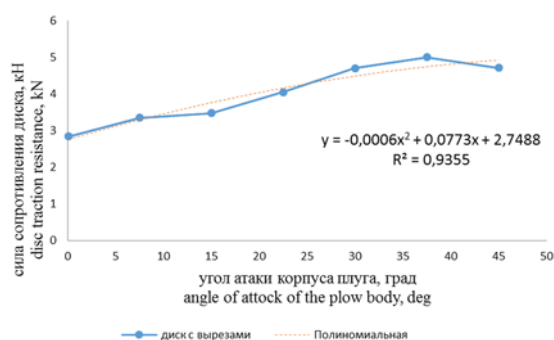


Рисунок 4. Зависимости тягового сопротивления диска от угла атаки

Figure 4. Dependence of the traction resistance of the disk on the angle of attack

Источник: Собственная композиция автора  
Source: Authors' own calculation

Проведя расшифровку графика влияния угла атаки дисков с вырезами на максимальные значения тяговых усилий (рис. 4), можно сказать о том, что максимальное тяговое сопротивление за счет увеличения угла атаки дисков от 0 до 30° поднимается в диапазоне от 3 до 4,2 кН. Регрессионный показатель и уравнение тренда равно ( $R^2 = 0,9355$ ;

$y = -0,0006x^2 + 0,0773x + 2,7488$ ). С последующим увеличением угла атаки до 45° значение максимального усилия становится 4,7 кН, что говорит о прямой зависимости угла атаки и тягового сопротивления.

## Обсуждение

Проблематикой повышения качества обработки почвы дисковыми орудиями как в сельском, так и в лесном хозяйствах занимаются много ученых.

Особую роль занимает энергетическая составляющая процесса обработки почвы. Исследования по снижению тяговых сопротивлений занимают особую роль в этом направлении. В работе В.П. Горобей (2019) [8] исследуется тяговое сопротивление зубчатого дискового рабочего органа на различных скоростях движения агрегата. В процессе эксперимента выявлена закономерность между тяговым сопротивлением и высотой зуба. При увеличении высоты зуба тяговое сопротивление снижается в 3 раза с 300 до 100 Н ( $R^2 = 0,93$ ). В работе также исследовались частотные колебания и связь их с графиком тяговых усилий. В работе рекомендовано устанавливать рабочие органы с амортизирующими механизмами для защиты орудия от разрушения.

В настоящем не учитывался колебательный (частотный) процесс, который оказывает большое влияние на долговечность агрегата.

Научные исследования К.С. Перфильевой (2022) [15] проводились над дисковым орудием багетного типа луцильник ЛДГ-10. Рассчитывалась площадь поверхности контакта с почвой при углах атаки 15 и 35 градусов. Выведены конечные графики зависимостей тяговых сопротивлений дисков от углов атаки при глубине хода орудия 60 мм, 90 мм, 120 мм. Видно, что при увеличении угла атаки, сопротивление возрастает прямолинейно до угла атаки равным 25 градусов, а при последующем увеличивается угла атаки, криволинейно в 35 градусов.

Исследование показывает схожесть закономерностей в результатах, что подтверждается независимыми исследованиями при различных условиях и с учетом того, что исследовался процесс с принудительным вращением от гидромотора вырезного диска.

В результате исследования по кинематическому анализу процесса работы диска, имеющего

переменную кривизну рабочей поверхности, В.И. Коновалов, С.И. Коновалов, А.Г. Коновалов (2023) [9] сделали вывод, что поступательная скорость диска и угол атаки оказывает большое влияние на величину и направление абсолютной скорости точки. В связи с этим перемещение пласта вдоль рабочей поверхности приводит к повышению его крошения.

Отличительной особенностью этого исследования от представленного в статье является то, что здесь исследуется взаимодействие пласта почвы на внутренней поверхности диска с переменной кривизной профиля. Точка находится в свободном положении. Текущие допущения при математическом моделировании подразумевали контакт с почвой на режущей грани диска с учетом вырезов и принудительного вращения диска.

При использовании вырезных дисков в батаре [4] угол атаки вырезного диска изменялся от 12 градусов и до 24 градусов. Исследовалась зависимость ширины обработки почвы от угла атаки для двух диаметров диска 0,8 и 0,66 м. Выявлено, что диск диаметром 0,8 м имеет большую площадь обработки от 0,076 до 0,14 м развивающуюся по линейной зависимости, но при этом в междурядной обработке коэффициент измельчения междискового пространства ниже, чем у диска диаметром 0,66 м. При этом коэффициент рыхления почвы в междисковом пространстве для диска диаметром 0,66 м развивается по линейной зависимости от 0,6 до 1,2, что на 0,1 выше, чем у диска диаметром 0,8.

Коэффициент крошения почвы и ширина обработки полосы будут определены в будущих экспериментах.

Исследования диска на дальность отбрасывания почвогрунта И. С. Крук и соавторов (2022) [12]

показали зависимость дальности отбрасывания почвогрунта от угла крена  $\gamma$  в пределах от 30 до 48 градусов и угла атаки  $\alpha$  в диапазоне от 10 до 18 градусов при диаметре диска 0,45 м и радиусе кривизны диска 0,65 м. Выявлена линейная зависимость между этими величинами. При увеличении угла крена и угла атаки дальность отбрасываемого пласта почвы возрастает от 0,25 до 0,86 м. Эти качественные показатели также планируется измерить в будущем экспериментально.

### Заключение

Проведенный обзор исследований рабочих процессов дисковых рабочих органов технологических машин показал, что применяемые лесные дисковые почвообрабатывающие орудия, имеют существенные недостатки, заключающиеся в недостаточной заглубляемости дисков, из-за чего снижается качество обработки почвы, а также в высоких динамических нагрузках при встрече с различными препятствиями, которые снижают ресурс агрегата. Разработана математическая модель рабочих процессов гидропривода задних дисков с вырезами для полосной обработки почвы. Выявлены максимальные показатели давлений рабочей жидкости в гидросистемах. При изменении угла атаки сферических дисков от 0 до 30° давление рабочей жидкости снижается на 23 %. При дальнейшем увеличении угла атаки до 45° давление рабочей жидкости возрастает на 15 %, что говорит о нелинейной зависимости этих параметров. Максимальное тяговое сопротивление возрастает при изменении угла атаки сферического диска от 0 до 30° и увеличивается на 29 %, а после изменения угла атаки на 45° поднимается на 11 %. По выведенным формулам можно предварительно оценить кинематические и динамические параметры дисковых рабочих органов, имеющих вырезы на режущей поверхности диска.

### Список литературы

1. Раабе Д.С., Бегунов М.А., Коваль В.С., Черняков А.В., Коростелев Д.Н. Анализ дисковых орудий для поверхностной обработки почвы. Современное научное знание в условиях системных изменений, материалы Пятой национальной научно-практической конференции. 2021: 136-145. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46544756>
2. Малюков С. В., Лысыч М. Н., Бухтояров Л. Д., Поздняков Е. В., Гнусов М. А., Шавков М. В., Петков А. Ф. Анализ дисковых рабочих органов лесных почвообрабатывающих орудий. Лесотехнический журнал. 2023; 2 (50): 128–141 – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/7>.

3. Великанов В.А., Филичкин А.Е., Головин А.Ю. Анализ основных параметров дисковых рабочих органов. Сборник IV Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. 2023: 29-32. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50436770>
4. Припоров Е.В. Анализ полноты обработки почвы в междисковом пространстве двухследного дискового орудия. Известия оренбургского государственного аграрного университета. 2019: 85-88. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37013939>
5. Долматов С. Н., Сухенко Н. В. Влияние параметров рабочего органа дискового рыхлителя на технологический процесс нарезки борозд при лесовосстановлении. Хвойные бореальной зоны. 2022: 529–537. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50097037>
6. Зимарин С. В., Четверикова И. В. Исследование процесса оборота почвенного пласта новым корпусом дискатора на нераскорчеванных вырубках. Resources and Technology. – 2021; 18 1: 53-65. DOI:<https://doi.org/10.15393/j2.art.2021> .
7. Лысыч М.Н. Исследование процесса обработки почвы дисковым культиватором с использованием метода дискретных элементов. Современные наукоемкие технологии. 2020: 59-64. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42596711>
8. Горобей В.П. Исследование тягового сопротивления рабочего органа почвообрабатывающего орудия с зубчатым дисковым ножом. Машиностроение: инновационные аспекты развития, материалы II международной научно-практической конференции. 2019; 90-93. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37355236>
9. Коновалов В.И., Коновалов С.И., Коновалов А.Г. Кинематический анализ дискового рабочего органа с изменяющимся радиусом кривизны. Политематический сетевой электронный научный журнал кубанского государственного аграрного университета. 2023: 22-34. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50232296>
10. Князев А.Г., Камалова Н.С., Юдин Р.В. Системный подход к сравнительному анализу плугов для обработки почв при лесовосстановлении. Воронежский научно-технический Вестник. – 2020; 4(34): 23-29. DOI: <https://doi.org/10.34220/2311-8873-2021-4-4-23-29>
11. Зимарин С.В. Новая конструкция корпуса дискатора. Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2018: 315-321. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36676661>
12. Крук И.С. [и др.] Определение кинематических параметров движения пласта почвы по рабочей поверхности дискового предплужника. Агропанорама. 2022; 4: 14-18. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49437343>
13. Руднев С.Г., Тарасенко Б. Ф., Дробот В. А., Сарксян М. Д. Определение удельного сопротивления дискового плуга. Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021; 6(92): 141-146. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47395390>
14. Попиков П. И., Поздняков А. К., Усков В. И. [и др.] Теоретическое исследование кинематических и динамических характеристик шнекового рабочего органа лесопожарной грунтометательной машины. Лесотехнический журнал. 2021; 3(43): 140-151. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.3/12>
15. Перфильева К.С. Тяговое сопротивление дискового рабочего органа. Студенческая наука об актуальных проблемах и перспективах инновационного развития регионального АПК. Материалы XXI научно-практической конференции обучающихся. 2022: 112-116. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48465955>
16. López-Vázquez A., Cadena-Zapata M., Campos-Magaña S., Zermeño-Gonzalez A., Mendez-Dorado. M. Comparison of energy used and effects on bulk density and yield by tillage systems in a semiarid condition of Mexico. Agronomy. 2019; 9 (4): 189. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy9040189>.
17. Shafaei S. M., Loghavi M., Kamgar S. A. A comparative study between mathematical models and the ANN data mining technique in draft force prediction of disk plow implement in clay loam soil. Agricultural Engineering International CIGR Journal. 2018; 20(2): 71-79.

18. Almaliki S. Simulation of draft force for three types of plow using response surface method under various field conditions. *Iraqi Journal of Agricultural Sciences*. 2018; 49(6): 1123-1124. DOI: <https://doi.org/10.36103/ijas.v49i6.151>.
19. Yudina N.Yu., Yudin R.V., Maksimenkov A.I. Simulation of loading dynamics and hydrodynamics of drives of forest machine working bodies. В сборнике: *ИОП Conference Series: Earth and Environmental Science*. Сер. "International Forestry Forum "Forest Ecosystems as Global Resource of the Biosphere: Calls, Threats, Solutions" 2021: 12060. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012060>.
20. Uskov V. I. Initial-Boundary Value Problem for Perturbed Third Order Partial Differential Equations. *Journal of Mathematical Sciences*. 2021; 255(6): 779-789. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10958-021-05415-1>.
21. Zubova, S.P., Uskov, V.I. Asymptotic Solution of the Cauchy Problem for a First-Order Equation with a Small Parameter in a Banach Space. The Regular Case. *Math Notes*. 2018; 103: 395-404. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0001434618030069>.

### References

1. Raabe D.S., Begunov M.A., Koval' V.S., CHernyakov A.V., Korostelev D.N. Analiz diskovyh orudij dlya poverhnostnoj obrabotki pochvy. [Analysis of disk tools for surface tillage]. *Sovremennoe nauchnoe znanie v usloviyah sistemnyh izmenenij, materialy Pyatoy nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii = Modern scientific knowledge in the context of systemic changes, materials of the Fifth National Scientific and Practical Conference*. 2021: 136-145. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46544756>
2. Malyukov S. V., Lysych M. N., Buhtoyarov L. D., Pozdnyakov E. V., Gnusov M. A., Shavkov M. V., Petkov A. F. Analiz diskovyh rabochih organov lesnyh pochvoobrabatyvayushchih orudij. [Analysis of disk working bodies of forest soil-cultivating implements]. *Lesotekhnicheskii zhurnal = Forestry Engineering journal*. 2023 2 (50): 128-141. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/7>
3. x Velikanov A. F., Filichkin A.E., Golovin A.YU. Analiz osnovnyh parametrov diskovyh rabochih organov. [Analysis of the main parameters of disk working bodies]. *Sbornik IV Vserossijskoj (nacional'noj) nauchno-prakticheskoy konferencii. =Collection of the IV All-Russian (national) Scientific and Practical Conference*. 2023: 29-32. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50436770>
4. Priporov E.V. Analiz polnoty obrabotki pochvy v mezhdiskovom prostranstve dvuhslednogo diskovogo orudiya. [Analysis of the completeness of soil cultivation in the interdisc space of a double-track disc implement]. *Izvestiya orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = News of the Orenburg State Agrarian University*. 2019: 85-88. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37013939>
5. Dolmatov S. N., Suhenko N. V. Vliyanie parametrov rabocheho organa diskovogo ryhlitel'ya na tekhnologicheskij process narezki borozd pri lesovosstanovlenii. [Influence of the parameters of the working body of the disk ripper on the technological process of cutting furrows during reforestation]. *Hvojnye boreal'noj zony = Conifers of the boreal zone*. 2022: 529-537. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50097037>
6. Zimarin N. V., Chetverikova I. V. Issledovanie processa oborota pochvennogo plasta novym korpusom diskatora na neraskorchevannyh vyrubkah. [Study of the process of turnover of the soil layer with a new diskator body in ungrazed fellings]. *Resources and Technology*. 2021; 18: 53-65. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2021>
7. Lysych M.N. Issledovanie processa obrabotki pochvy diskovym kul'tivatorom s ispol'zovaniem metoda diskretnykh elementov. [Study of the process of tillage with a disc cultivator using the discrete element method]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern high technology*. 2022: 59-64. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42596711>
8. Gorobej V.P. Issledovanie tyagovogo soprotivleniya rabocheho organa pochvoobrabatyvayushchego orudiya s zubchatym diskovym nozhom. [Study of the traction resistance of the working body of a soil-cultivating implement with a toothed disc blade]. *Mashinostroenie: innovacionnye aspekty razvitiya, materialy II mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Mechanical engineering: innovative aspects of development, materials of the II international scientific and practical conference*. 2019: 90-93. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37355236>



9. Konovalov V.I., Konovalov S.I., Konovalov A.G. Kinematicheskij analiz diskovogo rabocheho organa s izmenyayushchimsya radiusom krivizny. [Kinematic analysis of a disk working body with a varying radius of curvature]. Politematicheskij setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Polythematic network electronic scientific journal of Kuban State Agrarian University. 2023; 22-34. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50232296>
10. Knyazev A. G., Kamalova N. S., Yudin R. V. Sistemnyj podhod k sravnitel'nomu analizu plugov dlya obrabotki pochv pri lesovosstanovlenii. [A systematic approach to the comparative analysis of plows for soil cultivation during reforestation]. Voronezhskij nauchno-tekhnicheskij Vestnik = Voronezh Scientific and Technical Bulletin. 2023; 34: 23-29. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/2311-8873-2021-4-4-23-29>
11. Zimarin S.V. Novaya konstrukciya korpUSA diskatora. [New design of the disk drive housing]. Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika = Current directions of scientific research of the 21st century: theory and practice. 2018: 315-321. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36676661>
12. Kruk I.S. [i dr.] Opredelenie kinematicheskikh parametrov dvizheniya plasta pochvy po rabochej poverhnosti diskovogo predpluzhnika. [Determination of kinematic parameters of the movement of the soil layer along the working surface of the disc skimmer]. Agropanorama = Agropanorama. 2022; 4: 14-18. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49437343>
13. Rudnev S. G., Tarasenko B. F., Drobot V. A., Sarksyanyan M. D. Opredelenie udel'nogo soprotivleniya diskovogo pluga. [Determination of the resistivity of a disc plow]. Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = News of the Orenburg State Agrarian University. 2021; 6(92) : 141-146. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47395390>
14. Popikov P. I., Pozdnyakov A. K., Uskov V. I. [i dr.]. Teoreticheskoe issledovanie kinematicheskikh i dinamicheskikh harakteristik shnekovogo rabocheho organa lesopozharnoj gruntometatel'noj mashiny. [Theoretical study of the kinematic and dynamic characteristics of the auger working body of a forest fire soil-throwing machine]. Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering journal. 2021; 3(43): 140-151. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.3/12>
15. Perfil'eva K.S. Tyagovoe soprotivlenie diskovogo rabocheho organa. [Traction resistance of the disk working body]. Studencheskaya nauka ob aktual'nykh problemah i perspektivah innovacionnogo razvitiya regional'nogo APK, Materialy XXI nauchno-prakticheskoy konferencii obuchayushchihhsya = Student science on current problems and prospects for innovative development of the regional agro-industrial complex, Materials of the XXI scientific and practical conference of students. 2022: 112-116. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48465955>
16. López-Vázquez A., Cadena-Zapata M., Campos-Magaña S., Zermeño-Gonzalez A., Mendez-Dorado. M. Comparison of energy used and effects on bulk density and yield by tillage systems in a semiarid condition of Mexico. Agronomy. 2019; 9 (4): 189. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy9040189>
17. Shafaei S. M., Loghavi M., Kamgar S. A. A comparative study between mathematical models and the ANN data mining technique in draft force prediction of disk plow implement in clay loam soil. Agricultural Engineering International CIGR Journal. 2018; 20(2): 71-79.
18. Almaliki S. Simulation of draft force for three types of plow using response surface method under various field conditions. Iraqi Journal of Agricultural Sciences. 2018; 49(6): 1123-1124. DOI: <https://doi.org/10.36103/ijas.v49i6.151>
19. Yudina N.Yu., Yudin R.V., Maksimenkov A.I. Simulation of loading dynamics and hydrodynamics of drives of forest machine working bodies. В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. "International Forestry Forum "Forest Ecosystems as Global Resource of the Biosphere: Calls, Threats, Solutions" 2021: 12060. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012060>
20. Uskov V. I. Initial-Boundary Value Problem for Perturbed Third Order Partial Differential Equations. Journal of Mathematical Sciences. 2021; 255(6): 779-789. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10958-021-05415-1>.

21. Zubova, S.P., Uskov, V.I. Asymptotic Solution of the Cauchy Problem for a First-Order Equation with a Small Parameter in a Banach Space. The Regular Case. Math Notes. 2018; 103: 395–404. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0001434618030069>

### Сведения об авторе

✉ *Князев Александр Геннадьевич* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5139-0374>, e-mail: [Knjazv-sasha@rambler.ru](mailto:Knjazv-sasha@rambler.ru).

### Information about the author

✉ *Alexander G. Knyazev* – postgraduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5139-0374>, e-mail: [Knjazv-sasha@rambler.ru](mailto:Knjazv-sasha@rambler.ru).

✉ – Для контактов | Corresponding author

Научный обзор


DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/6>

УДК 630 : 676.051.32



## Анализ конструктивных особенностей привода рубильных машин для измельчения энергетического древесного сырья

Сергей В. Фокин<sup>1</sup>✉, [feht@mail.ru](mailto:feht@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-9575-7764>

Полина Ю. Медведева<sup>1</sup>, [pelageam@mail.ru](mailto:pelageam@mail.ru)  <https://orcid.org/0009-0003-9708-4182>

Виктор П. Попиков<sup>2</sup>, [kafedra.laip@inbox.ru](mailto:kafedra.laip@inbox.ru)  <https://orcid.org/0000-0003-2499-2772>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова», пр-т им. Петра Столыпина зд. 4, стр. 3, г. Саратов, 410012, Российская Федерация

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

Одним из основных направлений развития лесной и деревообрабатывающей промышленности в данном контексте является использование метода переработки отходов и низкокачественной древесины на технологическую щепу. Этот метод позволяет оптимизировать использование ресурсов деловой древесины, сохраняет площади лесных массивов, снижает затраты на лесовосстановление и заготовку древесины, а также увеличивает долю выхода древесины с лесных территорий на 20-25 %. «Зеленая энергетика», несомненно, имеет свои затраты, но привлекательна по ряду других факторов, например, как средство осознанного подхода государства к своим природным ресурсам и экологической ситуации. Энергетика на основе растительной и древесной биомассы продолжает набирать популярность во многих странах мира, становясь самокупаемой и конкурентоспособной альтернативой ископаемому топливу. Плантационное лесовыращивание может стать прорывным направлением в обеспечении энергобезопасности страны на основе возобновляемых источников энергии. Для создания энергетических лесов применяются быстрорастущие растения, такие как тополь, ива и осина. В процессе переработки продукции плантационных лесов в щепу используется широкий спектр рубильных машин, которые играют важную роль в получении конечной продукции. Они различаются по типу механизма резания, мобильности, а также по типу привода. При этом приводные устройства являются основным элементом в конструкции данного оборудования и оказывают значительное влияние на выбор силовой установки и параметры технологического процесса измельчения сырья. Однако вопрос классификации рубильных машин по типу привода получил недостаточное развитие в научной литературе. Поэтому в работе авторами проведен анализ видов приводов рубильного оборудования для древесного сырья, который может стать основой для создания концепции конструктивной схемы нового рубильного оборудования, отличающегося высокой надежностью эксплуатации и безопасностью производства работ при измельчении продукции энергетических лесов в топливную щепу.

**Ключевые слова:** лесные плантации, рубильная машина, привод, щепа

**Финансирование:** данное исследование не получало внешнего финансирования.

**Благодарности:** авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

**Конфликт интересов:** авторы данной статьи заявляют об отсутствии личных, коммерческих, идеологических, интеллектуальных конфликтов интересов при подготовке, написании и публикации данной статьи.

**Для цитирования:** Фокин, С. В. Анализ конструктивных особенностей привода рубильных машин для измельчения энергетического древесного сырья / С. В. Фокин, П. Ю. Медведева, В. П. Попиков // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 1 (53). – С. 95–115. – Библиогр.: с. 108–115 (45 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/6>.

*Поступила* 18.01.2024. *Пересмотрена* 02.02.2024. *Принята* 13.02.2024. *Опубликована онлайн* 20.03.2024.

*Review*

### **Analysis of design features of chipper drive for chopping energy wood raw materials**

**Sergei V. Fokin**<sup>1</sup>✉, [feht@mail.ru](mailto:feht@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-9575-7764>.

**Polina Y. Medvedeva**<sup>1</sup>, [pelageam@mail.ru](mailto:pelageam@mail.ru)  <https://orcid.org/0009-0003-9708-4182>

**Victor P. Popikov**<sup>2</sup>, [kafedra.laip@inbox.ru](mailto:kafedra.laip@inbox.ru)  <https://orcid.org/0000-0003-2499-2772>

<sup>1</sup>*Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, Petr Stolypin Ave., zd. 4, pp. 3, Saratov, 410012, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation*

One of the main directions of development of the forest and woodworking industry in this context is the use of the method of processing waste and low-quality wood into technological chips. This method allows to optimize the use of business wood resources, preserves forest areas, reduces the cost of reforestation and timber harvesting, and increases the share of timber yield from forest areas by 20-25%. "Green energy" undoubtedly has its costs, but is attractive for a number of other factors, for example, as a means for the state to take a conscious approach to its natural resources and environmental situation. Plant and woody biomass-based energy continues to gain popularity in many countries around the world, becoming a self-sustaining and competitive alternative to fossil fuels. Plantation forestry can become a breakthrough direction in ensuring the country's energy security on the basis of renewable energy sources. Fast growing plants such as poplar, willow and aspen are used to create energy forests. In the process of processing plantation forest products into wood chips, a wide range of chippers are used, which play an important role in the final product. They differ in terms of the type of cutting mechanism, mobility as well as the type of drive. At the same time, drive devices are the main element in the design of this equipment and have a significant impact on the choice of power plant and the parameters of the technological process of chopping raw materials. However, the issue of classification of chopping machines by type of drive has received insufficient development in the scientific literature. Therefore, in this paper the authors analyzed the types of drives of chopping equipment for wood raw materials, which can be the basis for creating the concept of a constructive scheme of new chopping equipment, characterized by high reliability of operation and safety of work production when chopping the products of energy forests into fuel chips.

**Keywords:** *forest plantations, chopping equipment, wood chips.*

**Funding:** this study did not receive external funding.

**Acknowledgments:** the authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of the article.

**Conflict of interest:** the authors of this article declared the absence of personal, commercial, ideological, intellectual conflicts of interest in the preparation, writing and publication of this article.

**For citation:** Fokin S.V., Medvedeva P.Y., Popikov V.P. (2024). Analysis of design features of chipper drive for chopping energy wood raw materials. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 1 (53), pp. 95-115 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/6>.

*Received* 18.01.2024.

*Revised* 02.02.2024.

*Accepted* 13.02.2024.

*Published online* 20.03.2024.

### Введение

Плантационное лесовыращивание является одним из самых перспективных направлений, способных решить широкий комплекс задач по социально-экономическому развитию лесных территорий и повышению экологичности экономики страны, включая ее топливно-энергетический комплекс [1, 2].

В таких странах, как Швеция, Канада, Австрия и США, существуют специально выращенные леса, известные как энергетические плантации, биомасса с которых используется для производства тепловой и электрической энергии, что подчеркивает актуальность разработки данного направления [3,4].

Хорошо продуманная организация переработки древесных отходов, которые образуются при выращивании деревьев на плантациях и при переработке древесного сырья для получения конечной продукции, является важным фактором успешности создания энергетических плантаций и планирования их территории [5, 6].

Для эффективной переработки тонкомерного древесного сырья рекомендуется использование мобильных рубильных машин для механической переработки древесного сырья. Одним из основных этапов этого процесса является измельчение древесины до мелких частиц, обеспечивающих однородный размер [7, 8].

Такая операция необходима для облегчения транспортировки и последующего использования, полученной щепы [9, 10]. Среди всех технических средств, задействованных в процессе производства топливной щепы, рубильная машина выделяется своей высокой энергоемкостью, сложностью и значительной стоимостью [11, 12].

Представим классификацию существующих рубильных машин на сегодняшний день. Это классификация основана на различных характеристиках и позволяет более точно определить их варианты. Она выглядит следующим образом.

В первую очередь, классификация основана на типе механизма резания. Рубильные машины могут быть дисковыми, где рабочий орган представляет собой плоский или профильный диск с ножами на нем. Альтернативой являются барабанные модели, где рабочий орган выполнен в виде барабана с ножами, цилиндрическим, конусным или в виде двух конусов, расположенных на одной оси и соединенных вершинами.

Далее рубильные машины классифицируются по способности перемещаться. Они могут быть стационарными или передвижными. Последние могут быть прицепными, полуприцепными или смонтированными на базовой раме трактора.

Третий критерий классификации – способ загрузки древесины. Рубильные машины могут иметь горизонтально расположенный питающий патрон, куда древесину подают цепным, ленточным транспортером, рольгангом или шнеками.

Также они могут иметь наклоненный в вертикальной плоскости питающий патрон, где древесина перемещается за счет гравитационных сил. Существуют рубильные машины с комбинированной загрузкой, оснащенные двумя патронами.

И, наконец, последний критерий классификации – вид эвакуации конечного продукта из машины. Она может происходить путем транспортировки вверх по щепопроводу с помощью воздушного потока, эвакуации вниз на транспортер или же по направлению подачи сырья в машину, что позволяет достичь "безударной" транспортировки щепы.

Таким образом, данная классификация позволяет систематизировать разнообразные варианты рубильных машин и более точно определить их характеристики и особенности.

Хочется отметить, что из всех классификационных признаков приводу отводится наименьшее внимание, а ведь именно привод представляет собой

комплекс устройств, предназначенных для активации работы машин и механизмов, включая их составные части.

Он выполняет функцию преобразования одного типа энергии в другой и передачи этой энергии исполнительному механизму. Привод можно рассматривать как "промежуточное звено" между приводным двигателем и рабочим механизмом, будто машина или движитель [15, 16, 17].

В зависимости от вида приводного устройства рубильные машины бывают с приводом от: автономного ДВС, вала отбора мощности (ВОМ) и электродвигателя.

Приводные механизмы, в составе рубильных машин, определяют высокую степень переработки древесины, повышенную производительность выполняемых работ при наименьшей энергоемкости во время осуществления технологических операций [18, 19, 20].

Цель настоящих исследований – проанализировать применяющиеся на практике приводы рубильных машин и создать конструктивную схему рубильной машины, исходя из ранее перечисленных требований.

### Материалы и методы

*Объект и предмет исследований.* Данная работа является аналитическим обзором в области механизации работ при переработке в щепу продукции плантационного лесовыращивания. Объект исследования: мобильные рубильные машины для измельчения древесного сырья. Предмет исследования: приводные устройства конструктивных узлов рубильных машин. Поиск и накопление материалов произведен согласно концепции обзора предметного поля [21, 22].

#### *Сбор данных*

При поиске соответствующих материалов были изучены научные работы как отечественных, так и иностранных ученых. Литературный поиск осуществлялся с использованием различных баз данных, включая электронные ресурсы, такие как eLIBRARY, КиберЛенинка, Академия Google, Scopus и Web of Science.

Основные запросы включали в себя темы "дисковые рубильные машины", "измельчение порубочных остатков", "disc chippers" и "wood chips".

Кроме того, были использованы учебные и научные материалы из фондов Саратовской областной научной библиотеки и научной библиотеки Вавиловского университета за период с 1980 по 2022 годы.

Патентный поиск проводился с использованием баз данных ФИПС, Яндекс. Патенты и Lens.org. При этом использовались следующие ключевые слова: "дисковые рубильные машины", "измельчение древесного сырья", "discchippers" и "woodchips".

#### *Анализ данных*

После проведения патентного и систематического поиска были выбраны наиболее релевантные конструкции рубильных машин. Был проведен статистический анализ их сходства и различий в режимах работы [45].

Оценка степени сходства и различия проводилась с применением кластерного анализа по методу k-средних, основанного на минимизации накопленной суммы квадратов расстояний от центра, с использованием программного пакета StatSoft Statistica v7.0 Rus.

Также в работе использовались общелогические методы исследования в части анализа видов приводов конструктивных узлов различного рубильного оборудования для древесного сырья, который позволил установить, что в настоящее время выпускаются рубильные машины со следующими типами приводов [23, 24]: от ВОМ или гидравлической системы трактора, от электродвигателя и от собственного двигателя (бензинового или дизельного).

Навесные и прицепные устройства получают вращение от ВОМ при помощи карданных валов, в то время как стационарные орудия используют ременные передачи.

Если речь идет о стационарных орудиях, шкив устанавливается на задний ВОМ трактора. В большинстве случаев лесозаготовительных машин, окружная скорость вращения ВОМ не зависит от скорости движения агрегата [25, 26].

Однако, некоторые орудия требуют изменения скорости вращения вала в соответствии с изменением скорости движения трактора. В конструкции ВОМ тракторов это требование учитывается. Зад-

ний и боковой ВОМ могут быть включены как независимо от других приводов, так и синхронно с ними. [27, 28].

Гидропривод является основным звеном для энергетического питания навесных устройств сельскохозяйственных тракторов и технологического оборудования промышленных тракторов.

По сравнению с механическим и пневматическим приводами, гидропривод предполагает большую универсальность, меньшую степень зависимости от металлоемкости и высокую надежность. Данная система включает в себя насос, гидравлический мотор, распределитель, масляный бак, маслопроводы и клапаны [29, 30].

Электрический привод – это электромеханическая система, включающая электродвигатель, преобразователь и управляющее устройство. Он предназначен для приведения в движение рабочих органов машин и управления. Для осуществления таких функций данный вид привода использует электрическую энергию.

Механическая энергия, генерируемая электроприводом, передается рабочим органам различных машин и механизмов при помощи различных промежуточных звеньев (валы, муфты и т.д.) [31, 32]. При необходимости подача энергии регулируется в соответствии с требованиями технологических режимов работы рабочего органа. [33, 34].

Двигатели внутреннего сгорания (ДВС), включая карбюраторные и дизельные, являются ключевыми источниками энергии для привода рубильных машин с автономным приводом. В силу своей лучшей экономичности, дизельные двигатели применяются для привода рубильных машин чаще, чем карбюраторные [37, 38, 39].

Они обладают КПД в диапазоне от 25 % до 37 %, в то время как у карбюраторных двигателей этот показатель не превышает 18-25 %. Кроме того, дизельные двигатели потребляют топливо на 40-50 % меньше, чем карбюраторные двигатели [35, 36].

Важно отметить, что двигатели внутреннего сгорания подвергаются определенным ограничениям по нагрузке, поэтому при выборе двигателя учитывают максимальную нагрузку. Для облегчения запуска двигателя под нагрузкой, возможности

прекратить работу механизмов машины без выключения двигателя, для снижения динамических нагрузок в системе его защиты от перегрузки, между двигателем и трансмиссией устанавливаются фрикционные или гидравлические муфты. [40, 41, 42, 43].

### Результаты

Исследование, проведенное путем сравнительного анализа параметров и режимов работы рубильных машин, представлено в табл. 1 и 2, а также на рис. 1–4.

Таблица 1

Сравнительный анализ режимов работы рубильных машин

Table 1

Comparative analysis of chipper operating modes

Машина Machine	Уст. мощность, кВт   Ins. power, kW	Производительность (по щепе), м <sup>3</sup> /ч   Productivity (forchips), m <sup>3</sup> / h	Скорость диска, мин <sup>-1</sup>   Disk rotation, min <sup>-1</sup>
МДР-0,8/ MDR-0.8	22	10	540
ВРМ-600/ VRM-600	18,5	5	2000
ИВН-1Г/ IVN-1G	29,4	20	1000
С52ИВН/ C52IVN	30	20	1000
SRUB-350M	7,5	3	1500
PPM-3/ RRM-3	5	3	1500
Каваста BX62m / Kavasta BX62m	18,5	5	1500
Laski LS 100/27 C	18,6	6	3000

Источник: открытые данные производителей оборудования

Source: open data from equipment manufacturers

Данные сравнительного анализа режимов работы рубильных машин, представленные в табл. 1, разделены на 4 кластера (рис. 1).

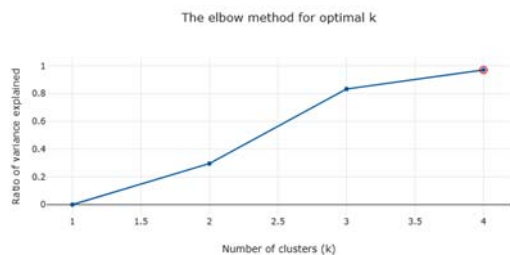


Рисунок 1. Зависимость для выбора количества кластеров при сравнительном анализе режимов работы рубильных машин

Figure 1. Dependence for selecting the number of clusters in the comparative analysis of chopping machine operation modes

Источник: Собственные вычисления авторов  
Source: Authors' own calculations

Для определения количества числа кластеров выбирался наименьший  $k$ , который объясняет не менее 90 % дисперсии (97,0487 %). Максимальное количество итераций в кластерах составило 4 (рис. 2).

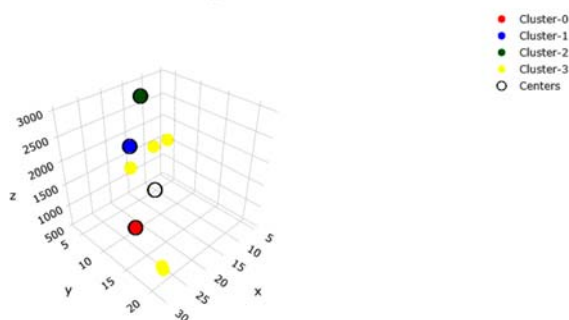


Рисунок 2. Идентификация кластеров при сравнительном анализе параметров конструкций рубильных машин

Figure 2. Identification of clusters in comparative analysis of chipper design parameters

Источник: Собственные вычисления авторов  
Source: Authors' own calculations

Анализируя диаграмму (рис. 2), можно сказать, что она разделена на четыре кластера. В первый кластер входит 1 рубильная машина (МДР-0,8), во второй кластер – тоже одна машина (ВРМ-600),

в третий – одна машина (Laski LS 100/27 C), в четвертый – 5 машин (ИВН-1Г, С52ИВН, SRUB-350М, PPM-3, KavastaBX62m).

В первый кластер вошла машина, которая имеет среднее значение установленной мощности (22 кВт), среднее значение производительности ( $10 \text{ м}^3 / \text{ч}$ ) и низкую скорость вращения диска ( $540 \text{ мин}^{-1}$ ). Во второй кластер включена машина, которая имеет среднее значение установленной мощности (18,5 кВт), низкое значение производительности ( $5 \text{ м}^3 / \text{ч}$ ) и высокую скорость вращения диска ( $2000 \text{ мин}^{-1}$ ).

Таблица 2

Сравнительный анализ параметров измельчения сырья рубильными машинами

Table 2

Comparative analysis of parameters of raw material grinding by chopping machines

Машина   Machine	Количество ножей, шт.   Number of knives, pcs	Диаметр из- мельчае- мого дре- весного сы- рья, мм   Diameter of chopped wood raw material, mm	Получаемый раз- мер щепы, мм   Obtained chip size, mm
МДР- 0,8/ MDR-0.8	4	не более 200	3-15
ВРМ-600/ VRM-600	3	не более 170	10-40
ИВН-1Г/ IVN-1G	4	не более 260	5-30
С52ИВН/ С52IVN	4	не более 200	5-30
SRUB- 350М	3	не более 50	25
PPM-3/ RRM-3	3	не более 300	5-30
Каваста BX62m / Kavasta BX62m	2	не более 100	3-15
Laski LS 100/27 C	4	не более 100	11

Источник: открытые данные производителей оборудования

Source: open data from equipment manufacturers



Машина, входящая в третий кластер, при самом высоком значении установленной мощности (29,4 кВт) имеет высокую производительность (20 м<sup>3</sup> /ч) и среднюю скорость вращения диска (1000 мин<sup>-1</sup>). В четвертом кластере собраны машины, имеющие различную установленную мощность (5-30 кВт) и различными значениями производительности (5 – 20 м<sup>3</sup> /ч), но примерно одинаковыми показателями скорости вращения диска (1000-1500 мин<sup>-1</sup>).

Данные в табл. 2 разделены на 3 кластера (рис. 3). Был выбран наименьший  $k$ , который объясняет не менее 90 % дисперсии. (93,4626 %). Максимальное количество итераций в кластерах составило 3 (рис. 4).

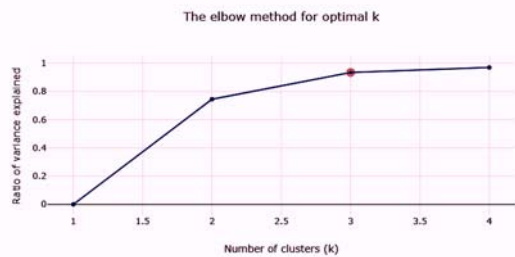


Рисунок 3. Зависимость для выбора количества кластеров при сравнительном анализе параметров измельчения сырья рубильными машинами  
Figure 3: Dependence for selecting the number of clusters in the comparative analysis of raw material grinding parameters by chippers

Источник: Собственные вычисления авторов  
Source: Authors' own calculations

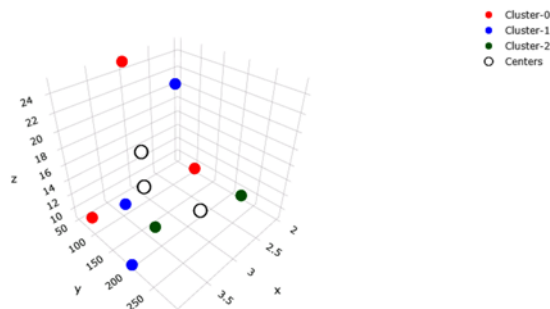


Рисунок 4. Идентификация кластеров при сравнительном анализе параметров измельчения сырья рубильными машинами  
Figure 4: Identification of clusters in the comparative analysis of raw material chopping parameters by chippers

Источник: Собственные вычисления авторов  
Source: Authors' own calculations

В конструкции *рубильных машин с приводом от вала отбора мощности и гидросистемы* можно выделить следующие группы:

1. Привод через ременную передачу измельчителя и через карданный вал механизма подачи;
2. Привод через карданную передачу измельчителя;
3. Привод через карданную передачу измельчителя и через гидромоторы механизма подачи.

Привод через ременную передачу измельчителя и через карданный вал механизма подачи применен в машине древесно-рубильная МДР-0,8, предназначенной для измельчения древесины в щепу, диаметр используемого ствола не более 150 мм для трактора Беларусь 82.1 и диаметр 200 мм для использования на тракторе МТЗ-1221.2, есть возможность подключения к электродвигателю. Измельченные древесные отходы, машина древесно-рубильная откидывает в сторону или грузит на транспортное средство (рис. 5).



Рисунок 5. Машина древесно-рубильная МДР-0,8  
Figure 5. Woodchopping machine MDR-0.8

Источник: каталог компании «Севертехника»  
Source: Severtchnika catalog.

URL: <https://sever-tehnika.ru/catalog/>

Машина снабжена дисковым рубильным органом с приводом от вала отбора мощности и системой передачи движения подачи материала для измельчения через ременную и зубчатую передачи, обеспечивающие вращение подающих вальцов, расположенных у входа в загрузочный патрон через карданные валы.

В случае заклинивания измельчаемого материала в кожухе рубильного диска возможно про-

скальзывание ремня ручье шкива, что можно рассматривать, как использование в конструкции машины предохранительного устройства.

Однако существенным недостатком данного конструктивного решения можно считать отсутствие в конструкции устройств экстренной остановки оборудования для повышения безопасности производимых работ.

Примером конструкции привода через карданную передачу измельчителя может являться рубильная машина (щепорез) ВРМ-600 (привод-ВОМ от трактора) (рис. 6), которая предназначена для измельчения древесины хвойных, мягких лиственных пород и березы с целью производства технологической и/или энергетической щепы.

Полученную в процессе измельчения щепу или опил направляют на дальнейшую грануляцию или используют в качестве продукта для отопления.



Рисунок 6. Дисковая рубильная машина (щепорез) ВРМ-600 (ВОМ от трактора)

Figure 6. Disc chipper VRM-600 (tractor PTO)

Источник: каталог компании ООО ЛесАгроМаш

Source: LesAgroMashLLC company catalog

URL:[https://tuzlist.ru/kirov/products/762411-](https://tuzlist.ru/kirov/products/762411-diskovaya-rubitelnaya-mashina-scheporez-vm-600-vom-ot-trakt/)

[diskovaya-rubitelnaya-mashina-scheporez-vm-600-vom-ot-trakt/](https://tuzlist.ru/kirov/products/762411-diskovaya-rubitelnaya-mashina-scheporez-vm-600-vom-ot-trakt/)

В данном устройстве дисковый рубильный диск получает движение через карданный вал, соединенный с ВОМ трактора напрямую без использования промежуточных предохранительных элементов. Подача древесного сырья для измельчения происходит гравитационным способом, т.е. под действием собственного веса сырья.

В качестве недостатка следует отметить факт отсутствия в конструкции привода рубильной машины предохранительных устройств, что может сказаться на работоспособности машины в случаях загрузки материала диаметром, не предусмотренным техническими возможностями оборудования, или его заклинивания в кожухе измельчителя.

Конструктивная схема привода через карданную передачу измельчителя и через гидромоторы механизма подачи реализована в измельчителе с гидроподачей навесном ИВН-1Г (Ø 160; 200; 260) (рис. 7).



Рисунок 7. Измельчитель с гидроподачей навесной ИВН-1Г

Figure 7. Shredder with hydraulic feed mounted IVN-1G

Источник: каталог компании ООО «Цетрагроснаб»

Source: LLC "Cetragro" company catalog

URL:<https://centragro59.ru/catalog/>

Машина снабжена рубильным диском и предназначена для переработки обрезков и отходов от древесины, а также для производства щепы и арболита. Навесной измельчитель веток устанавливается на трехточечную навеску трактора и подключается к ВОМу через карданный вал.

Промежуточных устройств для передачи вращательного движения конструкцией не предусмотрено. Также отсутствуют какие-либо предохранители на случай возникновения нештатных ситуаций. Энергетическое питание системы принудительной подачи сырья осуществляется от гидросистемы трактора.

Два зубчатых ролика (верхний и нижний), приводимые в действие двумя гидромоторами, затягивают материал и передают его в зону рубки. В конструкции измельчителя предусмотрено управление подачей материала с тремя положениями: "подача", "стоп" и "реверс".

Следует отметить, что наличие гидравлической подачи повышает скорость переработки сырья, но в случае заклинивания перерабатываемого сырья будет происходить перенаправление рабочего потока жидкости в резервную магистраль, что может сказаться на стабильности измельчения древесины в щепу.

Общим недостатком машин, оснащенных приводом от ВОМ, является отсутствие предохранительных устройств при передаче вращательного движения рубильному диску. Положительным моментом может являться применение гидропривода, но его характеризует высокая нестабильность работы в случае загрузки сырья, обладающего диаметром сырья не предусмотренными техническими возможностями машины.

Рубильные машины с электрическим приводом бывают следующих типов:

1. Привод через карданную передачу измельчителя через предохранительную муфту при гравитационной подаче;
2. Прямой привод измельчителя при гравитационной подаче;
3. Привод через ременную передачу привод измельчителя при гравитационной подаче измельчаемого материала.

*Привод через карданную передачу измельчителя через предохранительную муфту при гравитационной подаче* перерабатываемого материала применен в измельчителе веток дерева С52ИВН, который выпускается нескольких вариантах с приводом от ВОМ, электродвигателя и ДВС (рис. 8). Машина навесного типа.

Для измельчения щепы применен рубильный орган дискового типа. Механизм резания машины имеет 3 режущих ножа и 2 контрножа. Частота вращения диска составляет 1000 об/мин. Способен измельчать древесные отходы диаметром до 160 мм. Имеет производительность до 15 м<sup>3</sup>/ч. Устанавливается система регулировки размера получаемой щепы

«SizeControl» позволяет получать регулируемую фракцию щепы от 5 до 30 мм. Мощность привода от электродвигателя составляет 15-30 кВт.

Конструктивная особенность данной машины заключается в том, что она не имеет возможность производить измельчение тонкомерной древесины, превышающий диаметр более 30 мм, что соответствует техническим условиям получения продукции плантационных лесов.

Данный фактор обусловлен конструктивной схемой машины и тем, что она оборудуется электрическим приводом, главный недостаток которого – возрастание габаритных размеров с увеличением мощности двигателя.

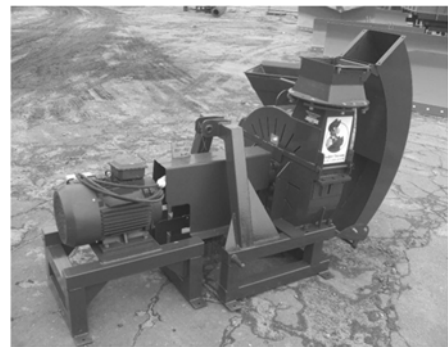


Рис. 8. Измельчитель веток дерева С52ИВН (с электроприводом)

Figure 8. Tree branch chopper С52IVN (with electric drive)

Источник: каталог компании ООО «Цетрагроснаб»

Source: LLC "CetragroSnaB" company catalog

URL: <https://centragro59.ru/catalog/>

*Прямой привод измельчителя при гравитационной подаче* имеет измельчитель древесины (щепорез) SRUB-350М (рис. 9), который предназначен для измельчения древесных отходов в щепу. Машина оснащена ротором с системами шипов и пазов, что позволяет получать калиброванную щепу без использования сеток.

Машина, используя в работе принцип постоянного самозахвата материала, обеспечивает выполнение заявленных технических возможностей при переработке древесины в щепу. Ножи изготовлены из стали марки 6ХВ2С, 6ХС, 9ХС по ГОСТ 25306-82. Конструктивно устройством является роторной дисковой дробилкой, снабженной тремя рубильными ножами.

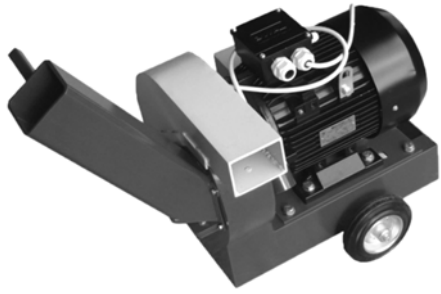


Рисунок 9. Измельчитель древесины (щепорез)  
SRUB-350M

Figure 9. Wood chipper SRUB-350M

Источник: каталог компании «Завод Инфел»

Source: Infel Plant catalog (<http://infel-moscow.ru/drobilki/SRUB.html>)

При переработке древесины на щепу сырье первоначально попадает в специальный патрубок, где происходит его самозахват и направление к режущему инструменту.

Привод данной машины имеет все те же конструктивные недостатки, что и предыдущая конструкция рубильной машины. Помимо прочего данный тип машины является прицепным.

При этом база устройства является недостаточно надежной для ее применения в условиях лесных плантаций, где имеется наличие каменистых включений и древесных остатков.

Привод через ременную передачу привод измельчителя при гравитационной подаче измельчаемого материала реализован в роторно-молотковой щепорубилке РРМ-3, которая предназначена для утилизации древесных отходов, древесины с порками, ветвей, сучьев и вершин деревьев (рис.10). В данной конструкции вращательное движение от силовой установки передается через систему шкивов измельчающему ротору.

Щепорубилку возможно использовать для изготовления технологической щепы, топливной щепы, щепы для производства стройматериалов (арболит, древесно-стружечные плиты). Рубильная машина РРМ-3, являясь машиной роторного типа, оснащенной, помимо 3 ножей, также еще 9 молотками, производящими доизмельчение произведенной щепы. Диаметр ротора равен 350 мм, а мощность электродвигателя от 5 кВт. Выход готовой продукции составляет от 1,5 до 3 м<sup>3</sup>/ч с параметрами щепы от 5 до 30 мм. Щепорубилка оборудуется системой для просеивания щепы.

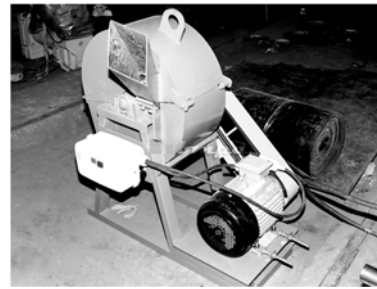


Рисунок 10. Роторно-молотковая щепорубилка  
РРМ-3

Figure 10. Rotary Hammer Chipper RRM-3

Источник: каталог компании

Ассоциация предприятий БМП

Source: company catalog Association of BMP Enterprises (<https://drobilka.ru/products/4360-rubitelnaia-mashina-rrm-3>)

Используемая конструкция привода через ременную передачу уменьшает нагрузку на вал рубильного диска в случае заклинивания материала, но применение одноручейковых шкивов значительно снижает качественные показатели рабочего процесса измельчения, так как при возрастании нагрузки на ротор возможно постоянное проскальзывание ремня по поверхности шкивов.

Общим недостатком рубильных машин с электрическим приводом является ограниченная возможность роста энергонасыщенности машин для увеличения производительности производимых работ в условиях лесных плантаций, в виду корреляции габаритов электрических приводов рубильных установок с их мощностными показателями, что снижает мобильность устройств.

Также вызывает вопрос недостаточной автономности электрических рубильных машин, применение которых увязывается с наличием надежного источника электроэнергии. При этом следует отметить, что продолжительная работа электродвигателей под нагрузкой способствует их перегреванию, а соответственно снижает надежность рабочего процесса измельчения тонкомерного сырья.

Автономный привод на базе ДВС может использовать следующие принципы передачи движения от силового агрегата:

1. Привод через ременную передачу измельчителя при гравитационной подаче измельчаемого материала;

2. Привод через карданную передачу измельчителя и через гидромоторы механизма подачи.

В измельчителе веток Каваста ВХ62м применен автономный привод от ДВС черезременную передачу измельчителя при гравитационной подаче измельчаемого материала.

Измельчитель веток Каваста ВХ62м (рис. 11) дробит ветки, рейки, рейки и другие древесные отходы на щепу длиной 90...100 мм. Максимальный диаметр измельчаемых ветвей 100 мм. Готовая продукция поступает в бункер. Устройство оборудовано бензиновым двигателем мощностью 18 л. с. и оснащено 2 рубильными ножами. Рубильная машина дискового типа.

Подача древесного сырья осуществляется с применением принципа самозахвата измельчаемого материала рубильными ножами. Максимальная производительность машины составляет 4 м<sup>3</sup>/ч. Привод рубильного диска осуществляется при помощи клиноременной передачи. Выброс готовой продукции верхний чрез щепопровод. Малые габариты машины позволяют использовать ручную тягу без применения технических средств.

Данное рубильное оборудование характеризуется малая производительность, что может сказаться на экономических характеристиках реализации проекта по плантационному лесовыращиванию. К сожалению, малая мощность ДВС не позволит машинам данного типа производить качественное измельчение продукции плантационного лесоразведения до необходимых параметров.



Рисунок 11. Измельчитель веток Каваста ВХ62м

Figure 11. Kavasta ВХ62m Twig Shredder

Источник: каталог компании «Даймонд Электрик»

Source: Diamond Electric catalog

URL: <https://saratorv.diamondelectric.ru/catalog>

Применение ручной тяги также является сдерживающим фактором применения данного оборудования, потому что плантации лесов могут находиться на местности со сложным рельефом, и для эффективного применения рубильной машины будет необходимо ее агрегатирование с тракторами.

Автономный привод от ДВС через карданную передачу привод измельчителя и через гидромоторы механизма подачи применен в щепорезе бензиновом Laski LS 100/27 С, который представляет собой измельчитель древесного материала диаметром до 100 мм (рис. 12).

Машина предназначена для утилизации веток, стволов, хвороста, коры и других надземных частей растений. Щепорез оборудован вальцами для подачи материала с гидравлическим приводом, автоматической системой защиты двигателя от перегрузки, счетчиком моточасов, откидным и поворотным патрубком выгрузки.

Рубильная машина дискового типа, оснащенная 4 режущими ножами. Имеет бензиновый двигатель с воздушным охлаждением Kohler мощностью 25 л.с. Масса транспортного средства с прицепом составляет менее 3,5 т. Производительность щепореза составляет от 3 до 8 м<sup>3</sup>/ч.



Рисунок 12. Щепорез бензиновый

Laski LS 100/27 C

Figure 12. Laski LS 100/27 C gasoline brush cutter

Источник: каталог компании «АгроДиалог»

Source: AgroDialog catalog

(<https://www.agrodialog.ru/tekhnika-dlya-sada-i-parka/izmelchiteli-vetok/kommunalnye-izmelchiteli-vetok/kommunalnyj-izmelchitel-vetok-laski-ls-100-27cb-1349.html>)

Недостатком данного рубильного оборудования является наличие шасси с недостаточно надежными опорными колесами, что предполагает ограничение в применении машин данного типа в переработке продукции плантационных лесов на щепу, в случае их размещения на участках со сложным рельефом или наличием в зоне работы естественных препятствий в виде пней или каменистых включений.

Общим конструктивным недостатком рубильных машин с автономным приводом от ДВС является недостаточная надежность работы данного оборудования ввиду того, что машины снабжаются двухтактными двигателями с воздушным охлаждением. Поэтому применение таких устройств сильно ограничивается по продолжительности процесса измельчения ввиду перегрева двигателей.

### Результаты и обсуждение

На основании проведенного анализа конструктивных особенностей привода рубильных машин для измельчения энергетического древесного сырья, дисковые рубильные органы, в составе рубильных машин, оснащенных приводом от вала отбора мощности трактора, имеют наиболее перспективные возможности их использования для переработки продукции плантационного лесовыращивания.

Существующие рубильные машины с различным типом приводов не позволяют выполнять эффективную работу на территориях, занятых лесными плантациями вследствие физических характеристик получаемой продукции и конструктивных особенностей измельчителей.

Разработанное нами устройство для измельчения древесных остатков (рис. 13, 14) относится к лесному хозяйству, в частности, к оборудованию для измельчения порубочных остатков. [44].

Технической задачей нашей разработки является повышение эффективности процесса измельчения древесного сырья путем создания надежного и безопасного привода рубильной машины, предназначенной для производства щепы из древесного сырья в условиях вырубков.

Устройство для измельчения порубочных остатков, содержащее корпус загрузочного патрона

призматической формы 1, щепопровод 2, измельчитель 3, кожух измельчителя 4, ременную передачу 5, приводной вал 6, механизм подачи 7, состоящий из подающего устройства пальчикового типа 8 и подающих валцов 9, раму подъемного устройства 10, гидроцилиндр 11, трубопровод 12, масляный бачок 13, режущие диски 14, консоль 15, систему шкивов 16, понижающий редуктор 17, вал 18, клиноременную передачу 19, опорную площадку 20, опорные подшипники 21, ленточный тормоз 22 с рукояткой 23, вал 24, многоручейковый шкив большего диаметра 25, многоручейковый шкив меньшего диаметра 27.

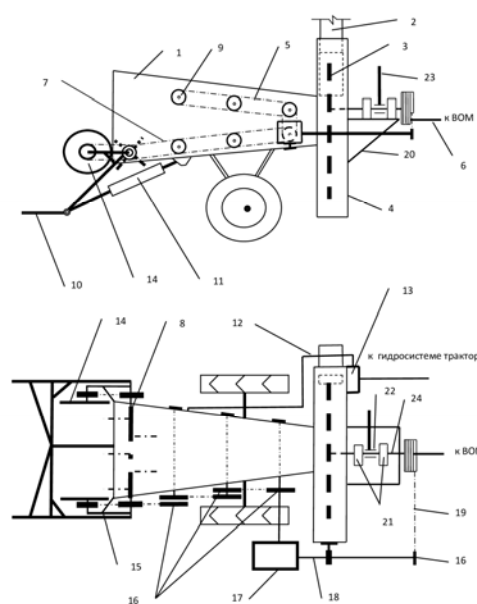


Рисунок 13. Устройство для измельчения порубочных остатков

Figure 13. Device for chopping felling residues

Источник: Авторский рисунок  
Source: Author's drawing

Устройство для измельчения порубочных остатков работает следующим образом.

Маневрированием трактора устройство подается к куче порубочных остатков таким образом, чтобы рама подъемного устройства 10, шарнирно закрепленная с внешней стороны боковых стенок корпуса загрузочного патрона 1, располагалась в нижней части кучи порубочных остатков.

После этого в гидроцилиндре 11 при помощи трубопровода 12 и масляного бочка 13, соединен-

ного с гидросистемой трактора, создается избыточное давление. Вследствие этого шток гидроцилиндра 11, выходя из корпуса гидроцилиндра 11, воздействует на раму подъемного устройства 10. Так как рама подъемного устройства 10 представляет собой многосвязную систему, то горизонтальное движение штока гидроцилиндра 11 преобразуется в вертикальное движение рамы подъемного устройства 10.

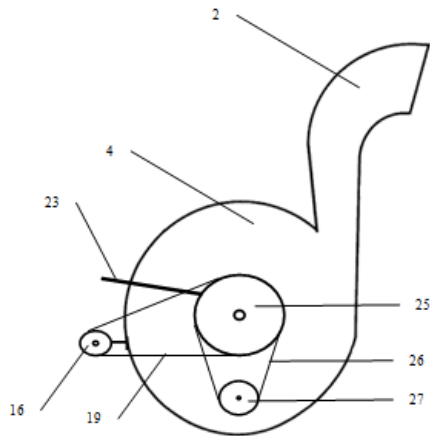


Рисунок 14. Механизм привода устройства для измельчения порубочных остатков  
Figure 14. Drive mechanism of the device for chopping felling residues

Источник: Авторский рисунок  
Source: Author's drawing

В результате куча порубочных остатков располагается на уровне большего основания корпуса загрузочного патрона 1, имеющего призматическую форму, прикрепленного меньшим основанием к измельчителю 3, а большее основание является входным отверстием для подачи порубочных остатков.

Вращающиеся режущие диски 14, имеющие жесткое крепление при помощи консоли 15 на оси подающего устройства пальчикового типа 8, расположенные по бокам входного окна корпуса загрузочного патрона 1, позволяют придать поступающим в корпус загрузочного патрона 1 порубочным остаткам нужные габаритные размеры.

Подающие вальцы 9, входящие в состав механизма подачи 7, оснащенные захватными зубьями, перпендикулярно прикрепленные к внутренним боковым стенкам корпуса загрузочного патрона 1 в два

ряда, обеспечивают постоянную подачу порубочных остатков в корпус загрузочного патрона 1 и дальнейшее движение порубочных остатков к измельчителю 3.

Вращательное движение подающего устройства пальчикового типа 8 и подающих вальцов 9, а соответственно и линейное движение измельчаемого материала в корпусе загрузочного патрона призматической формы 1 с определенной скоростью подачи, обеспечивается при помощи ременной передачи 5 и системы шкивов 16, которые через понижающий редуктор 17, вал 18, клиноременную передачу 19, соединенную с многоручейковым шкивом большего диаметра 25 через многоремennyй узел 26 и приводной вал 6 соединены с валом отбора мощности трактора через многоручейковый шкив меньшего диаметра 27.

Вращение измельчителя 3 производится через вал 24, соединенный с многоручейковым шкивом большего диаметра 25 и проходящего через опорные подшипники 21, размещенные на опорной площадке 20 и ленточный тормоз 22 с рукоятью 23. Разделенные измельчителем 3 порубочные остатки попадают в кожух измельчителя 4, а затем транспортируются в щепопровода 2 и далее поступают в приемную тару или остаются на вырубке для перегнивания.

Непрерывность подачи материала для измельчения обеспечивается путем перемещения машинно-тракторного агрегата на вырубке на пониженной передаче.

Конструкция устройства для измельчения порубочных остатков позволяет повысить эффективность процесса измельчения древесного сырья путем обеспечения безопасного производства работ при производстве щепы из порубочных остатков за счет использования ленточного тормоза с рукоятью и применения многоручейковых шкивов различного диаметра, соединенных между собой многоремennyм узлом.

### Заключение

На основе проведенного анализа конструктивных и технологических параметров приводов рубильных машин для измельчения древесного сырья, нами была разработана конструктивная схема прицепного устройства для измельчения порубочных

остатков дискового типа с приводом рубильного диска и механизма привода подающих вальцов от вала отбора мощности трактора через предохранительную муфту и систему ременных передач.

Отличительной особенностью машины является то, что вращение измельчителя производится через вал, соединенный с многоручейковым шкивом большого диаметра, проходящего через опорные подшипники, размещенные на опорной площадке и ленточный тормоз с рукоятью, а вращательное движение подающего устройства пальчикового типа и подающих вальцов обеспечивается при помощи ременной передачи и системы шкивов, которые через

понижающий редуктор, вал, клиноременную передачу, соединенную с многоручейковым шкивом большого диаметра через многоремный узел и приводной вал соединены с валом отбора мощности трактора через многоручейковый шкив меньшего диаметра.

Такое конструктивное исполнение устройства для измельчения порубочных остатков позволяет повысить качество производимой продукции в виде топливной щепы за счет увеличения скорости измельчения сырья, снижения энергоемкости процесса резания и повышения безопасности выполняемых работ.

### Список литературы

1. Беляев, С. В. Проблемы и перспективы получения и применения топлив из биомассы, снижающих выбросы парниковых газов / С. В. Беляев, М. С. Левина // *Resources and Technology*. 2022. №3, Т. 19. С. 83–100.- DOI: 10.15393/j2.art.2022.6463-URL:<https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-i-perspektivy-polucheniya-i-primeneniya-topliv-iz-biomassy-snizhayuschih-vybrosy-parnikovyh-gazov>.
2. Böhlenius, Henrik Nilsson, Urban Salk, Carl. (2020). Liming increases early growth of poplars on forest sites with low soil pH. *Biomass and Bioenergy*. 138. 105572. 10.1016/j.biombioe.2020.105572. DOI: 10.1016/j.biombioe.2020.105572. URL:<https://www.Sciencedirect.Com/science/article/abs/pii/S0961953420301069#preview-section-abstract>
3. Фокин, С. В. Обоснование конструкции машин фрезерного типа для получения биотоплива в условиях лесов степной и лесостепной зон Поволжья / С.В. Фокин, О.Н. Шпортько // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. 2014. Т. 2. № 5-3 (10-3). С. 156-160.-EDN: TEMEQJ-DOI:10.12737/6950-URL:<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22778809>.
4. Драпалюк, М. В. Ресурсосберегающие технологии и техника при плантационном лесовыращивании и заготовке древесного сырья / М. В. Драпалюк, П. И. Попиков // *Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе. Материалы международной научно-практической конференции*. 2021. С. 350-357.- EDNOIGFWG- URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47155573>.
5. Плыкин, В. Д. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии : учебное пособие. – Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2013. 172 с.-EDN: WEGYHY-URL:<https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=wegyhy>
6. Фокин, С. В. Об использовании древесных отходов при восстановлении защитных лесных полос / С. В. Фокин, О. Н. Шпортько, В. В. Цыплаков // *Научная жизнь*. 2015. № 6. С. 134-142. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25388509>.
7. Григорьева, О. И. Эффективная технология расчистки древесно-кустарниковой растительности / О. И. Григорьева, А. Б. Давтян // *Повышение эффективности лесного комплекса : Матер. Седьмой Всерос. нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием*. Петрозаводск, 2021. С. 34–35. – EDN: ZXLLFI. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=zxllfi>.
8. Беляев, С. В. Современное состояние и перспективы применения биомассы для получения биотоплив / С. В. Беляев, Г. А. Давыдов, С. Н. Перский // *Актуальные вопросы науки и техники*. 2015. С. 61–63. – EDN: TRCMYZ. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23355865>.
9. Фокин, С. В. Экологосберегающие технологии при ведении современных агролесомелиоративных мероприятий / С. В. Фокин, О. Н. Шпортько, А. С. Бурлаков // *Научная жизнь*. 2017. № 7. С. 78-91. EDN: ZHTTGX. URL:<https://elibrary.ru/item.asp?id=30058020>.



10. Технологический алгоритм производства продукции из порубочных остатков / А. П. Мохирев, К. П. Рукомойников, М. М. Герасимова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2023. № 1 (391). – С. 153–171. – DOI: 10.37482/0536-1036-2023-1-153-171. – URL: <https://journals.narfu.ru/index.php/fj/article/view/1343>.
11. Григорьев, И. В. Перспективные направления опытно-конструкторских работ в лесном машиностроении / И. В. Григорьев, О. А. Куницкая // Повышение эффективности лесного комплекса : Материалы III Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2017. С. 53–56. – EDN: YTQUTK. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32681201>.
12. Добрецов, Р. Ю. Проблемы и перспективы использования в лесном комплексе машин с полугусеничным двигателем / Р. Ю. Добрецов, А. С. Дмитриев, И. В. Григорьев // Вестник АГАТУ. 2022. № 4 (8). С. 95–105. – URL: <https://new.nlrs.ru/open/99671>.
13. Justice S., Biggs S. The spread of smaller engines and markets in machinery services in rural areas of South Asia // Journal of Rural Studies. 2020. Т. 73. P. 10–20. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.11.013>.
14. Liao W., Zeng F., Chanicabate M. Mechanization of Small-Scale Agriculture in China: Lessons for Enhancing Smallholder Access to Agricultural Machinery // Sustainability. – 2022. – Т. 14. – №. 13. – P. 7964. – DOI: <https://doi.org/10.3390/su14137964>.
15. Negrete J. C. Analysis of the current situation of two wheels tractors in Mexico // Horticult. Int J. – 2020. – Т. 4. – №. 1. – С. 28-33. – DOI: <https://doi.org/10.15406/hij.2020.04.00152>.
16. Peters M. D. J. et al. Scoping reviews: reinforcing and advancing the methodology and application // Systematic reviews. – 2021. – Т. 10. – №. 1. – P. 1-6. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s13643-021-01821-3>.
17. Rohani A. et al. Designing and modeling the power transmission mechanism for existing walking tractors to facilitate their guidance and turning // International Journal on Interactive Design and Manufacturing. – 2023. – Т. 10. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01516-0>.
18. Takeshima H. Custom-hired tractor services and returns to scale in smallholder agriculture: a production function approach // Agricultural Economics. – 2017. – Т. 48. – №. 3. – P. 363-372. – DOI: <https://doi.org/10.1111/agec.12339>.
19. Takeshima H., Nin-Pratt A., Diao X. Mechanization and agricultural technology evolution, agricultural intensification in sub-Saharan Africa: Typology of agricultural mechanization in Nigeria // American Journal of Agricultural Economics. – 2013. – Т. 95. – №. 5. – P. 1230-1236. – DOI: <https://doi.org/10.1093/ajae/aat045>.
20. Tangtong C. et al. Risk factors associated with hand tractor related injuries among rice farmers in Thailand // Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal. – 2022. – Т. 28. – №. 1. – P. 43-57. – DOI: <https://doi.org/10.1080/10807039.2021.2014301>.
21. Тихонова, Е. В. Обзор предметного поля как метод синтеза научных данных / Е. В. Тихонова, Н. М. Шленская // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2021. – № 3. – С. 11-25. – DOI 10.36107/spfp.2021.257. – EDN UUDXHJ. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48003100>.
22. Шамсутдинова, А. И. Внедрение инноваций в лесное хозяйство РФ и перспективы их развития / А. И. Шамсутдинова, Г. Ф. Илалова, А. Р. Мухтарова // Наука молодых - будущее России : Сборник научных статей 2-й Междунар. науч. конференции перспективных разработок молодых ученых. В 5 т., Курск, 13–14 декабря 2017 года / отв. ред. А. А. Горохов. Т. 5. – Курск : ЗАО "Университетская книга", 2017. – С. 211-213. – EDN YBBGRQ. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=31736899>.
23. Чебукова, А. В. Методические основы внедрения «бережливого производства» / А. В. Чебукова, Г. Р. Гарипова, Я. С. Чернявская // Качество в производственных и социально-экономических системах: сб. науч. тр. 7-й Междунар. научно-техн. конф. Курск, 2019. С. 188–190. – EDN: CSSHIT. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=csshit>.

24. Проблемы повышения качества отечественного лесного машиностроения / О. А. Куницкая, В. А. Макуев, Т. Н. Стородубцева [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 4 (56). С. 57–63. – EDN: OHGHQS. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49848720>.
25. Фокин, С. В. Об основных видах энергетической древесины / С. В. Фокин, О. А. Фомина // Forest Engineering : материалы научно-практической конференции с международным участием. 2018. С. 273-276. – EDN: SMBQRR. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35278500>.
26. Голякевич, С. А. Анализ и перспективы использования лесозаготовительной техники в природно-производственных условиях Республики Беларусь / С. А. Голякевич // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2021. № 2 (246). С. 188-195. – EDN: WYNXGI. – DOI: 10.52065/2519-402X-2021-246-23-188-195. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46408166>.
27. Фокин, С. В. Способы транспортирования щепы из рубильных машин / С. В. Фокин, О. А. Фомина // Научная жизнь. 2018. № 2. С. 10-15. – EDN: YVTTJL. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32788506>.
28. Varol T. et al. Efficiency Comparison of Mechanization Techniques in Nursery // European Journal of Forest Engineering. – 2019. – Т. 5. – № 2. – P. 68-76. – DOI: <https://doi.org/10.33904/ejfe.581652>.
29. Фокин, С. В. О конструктивных схемах подачи сырья к измельчителю в дисковых рубильных машинах / С. В. Фокин, О. Н. Шпортько // Инновационное техническое обеспечение агропромышленного комплекса : матер. науч.-техн. конференции с международным участием имени А.Ф. Ульянова. – Саратов, Вавиловский университет, 2023. С. 255-259. – EDN: UXRMCA. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=uxrmca>.
30. Zhang X., Yang J., Thomas R. Mechanization outsourcing clusters and division of labor in Chinese agriculture // China Economic Review. – 2017. – Т. 43. – P. 184–195. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chieco.2017.01.012>.
31. Фокин, С. В. К вопросу переработки древесных отходов на предприятиях АПК / С. В. Фокин, О. Н. Шпортько, К. С. Маньшев // Современное экологическое состояние природной среды и научно-практические аспекты рационального природопользования : Матер. II междунар. науч.-практ. интернет-конференции ФГБНУ «Прикаспийский НИИ аридного земледелия». 2017. С. 1822-1825. – EDN: ZANRSL. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29727486>.
32. Мясищев, Д. Г. Оптимизация конструктивных параметров системы "рабочий орган - мотошасси" для измельчения напочвенного растительного покрова / Д. Г. Мясищев, С. А. Путинцев // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2016. – № 215. – С. 149-162. – DOI 10.21266/2079-4304.2016.215.149-162. – EDN: WAXWCF. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26180945>.
33. Мясищев, Д. Г. Потенциал малой механизации в лесохозяйственных технологических процессах / Д. Г. Мясищев // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2018. – № 1(361). – С. 70–79. – DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.1.70. – EDN: YNMFBS. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32367561>.
34. Djordjevich S. J., Djordjevich-Miloshevich S. B., Miloshevich S. M. Assessment of Conditions and Experience for Plantation of Agro-Energy Crops on Degraded Agricultural Land in Serbia // World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering. 2016. Vol. 10(7). P. 447-50. DOI: [doi.org/10.5281/zenodo.1125827](https://doi.org/10.5281/zenodo.1125827) URL: <https://publications.waset.org/10005064>.
35. Якимов, В. А. Экспериментальное исследование лесного посевного агрегата на базе мотошасси / В. А. Якимов, Д. Г. Мясищев // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2, № 3-4(8-4). – С. 95–98. – DOI 10.12737/4347. – EDN: SHVQVL. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21744407>.
36. Заровняев, Т. Д. Технологический процесс по переработке отходов лесозаготовительного производства / Т. Д. Заровняев, Е. И. Никитина, О. А. Куницкая // Современные проблемы и достижения аграрной науки в Арктике : Сб. науч. ст. по материалам Всерос. студ. научно-практ. конф. с междунар. участием в рамках «Северного форума – 2020» (29-30 сент. 2020 г., Якутск) и Междунар. науч. онлайн летней школы – 2020 (6-20 июля 2020 г., Якутск). Якутск, 2020. С. 107–114. – EDN: QJTFUA. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=qjtfua>.

37. Новиков, А. И. Опыт применения альтернативных источников энергии в транспортно-технологическом комплексе / А. И. Новиков // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. – 2014. – Т. 1, № 1 (1). – С. 62–65. – EDN: TJQQLD. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23015125>.
38. Столбин, В. С. Анализ научных исследований в области оценки экологического воздействия лесопромышленных машин и технологий на лесные экосистемы / В. С. Столбин, С. А. Голякевич // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2020. – № 2 (234). – С. 149–159. – EDN: NOYNNM. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43937082>.
39. Котельников, Н. В. Техничко-экономическое обоснование проекта по внедрению биотопливного котла для утилизации древесных порубочных остатков / Н. В. Котельников, Е. В. Пруидзе, С. П. Гагунов // Байкальская наука: идеи, инновации, инвестиции. – Иркутск, 2019. С. 14–20. – EDN: NRPZQA. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42573994>.
40. Григорьев, В. И. Лесные плантации в Азиатско-Тихоокеанском регионе / В. И. Григорьев // Наука и инновации: векторы развития : матер. междунар. науч.-практ. конференции молодых ученых, Барнаул, 24-25 октября 2018 года. С. 75-78. – EDN: RZXKVD. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37324863>.
41. Технологический алгоритм производства продукции из порубочных остатков / А. П. Мохирев, К. П. Рукомойников, М. М. Герасимова, С. О. Медведев, М. А. Зырянов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 153–171. – EDN: RMNTFL. – DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-153-171>. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=rmntfl>.
42. Любов, В. К. Повышение эффективности энергетического использования биотоплива / В. К. Любов, И. И. Цыпнятов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 172–185. – EDN: JSRLLQ. – DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-172-185>. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50260969>.
43. Шегельман, И. Р. Типизация лесных территорий по природно-производственным условиям на основе кластерного анализа / И. Р. Шегельман, П. В. Будник // Изв. ВУЗов. Лесной журнал, 2021. № 1. С. 120–137. – EDN: XORRKH. – DOI: 10.17238/issn0536-1036. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44729465>.
44. Патент на полезную модель № 221 248 U1, МПК В27L 11/00 (2006.01), А01G 23/00 (2006.01), СПКВ27L 11/00 (2023.08), А01G 23/00 (2023.08) Устройство для измельчения порубочных остатков / Фокин С. В., Медведева П. Ю.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Вавиловский университет. – № 2023123326; заявл. 08.09.2023; опубл. 26.10.2023 Бюл. № 30.
45. Малюков, С. В. Анализ конструкций и режимов работы дисковых рубительных машин / С. В. Малюков, А. А. Аксенов, М. А. Малюкова // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11, № 4 (44). – С. 139–149. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/12. – <https://elibrary.ru/xknnup>.

### References

1. Belyaev S. V. Problems and prospects of production and application of biomass fuels reducing greenhouse gas emissions / S. V. Belyaev, M. S. Levina // Resources and Technology. V. Problems and prospects of obtaining and using biomass fuels that reduce greenhouse gas emissions / S. V. Belyaev, M. S. Levina // Resources and Technology. 2022. No. 3, Vol. 19. P. 83-100.- DOI: 10.15393/j2.art.2022.6463 - (In Russ.)- URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problem-i-perspektivy-poucheniya-i-primeneniya-topliv-iz-biomassy-snizhayuschih-vybrosy-parnikovyh-gazov>.
2. Böhlenius, Henrik Nilsson, Urban Salk, Carl. (2020). Liming increases early growth of poplars on forest sites with low soil pH. Biomass and Bioenergy. 138. 105572. 10.1016/j.biombioe. 2020.105572. DOI: 10.1016/j.biombioe.2020.105572.URL:<https://www.Sciencedirect.Com/science/article/abs/pii/S0961953420301069#preview-section-abstract>
3. Fokin S.V. Justification of the design of milling-type machines for biofuel production in the conditions of forests of steppe and forest-steppe zones of the Volga region / S.V. Fokin, O.N. Shportko // Actual directions of scientific research

of the XXI century: theory and practice. 2014. Т. 2. № 5-3 (10-3). P. 156-160.- EDN: TEMEQJ- DOI: 10.12737/6950- (In Russ.)-URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22778809>.

4. Drapalyuk M.V. Resource-saving technologies and techniques in plantation forestry and wood raw material harvesting / M.V. Drapalyuk, P.I. Popikov // In Collection: Energy efficiency and energy saving in modern production and society. Materials of the international scientific-practical conference. 2021. P. 350-357.- EDN OIGFWG- (In Russ.)- URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47155573>.

5. Plykin V.D. Non-traditional renewable energy sources: textbook// Izhevsk: Izhevsk: Izdvo "Udmurt University", 2013.172 p.- EDN: WEGYHY- (In Russ.)- URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=wegyhy>.

6. Fokin S.V. On the use of wood waste in the restoration of protective forest belts / S.V. Fokin, O.N. Shportko, V.V. Tsyplakov// Scientific Life. 2015. № 6. P. 134-142.- EDN: VJOZRD- (In Russ.)- URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25388509>.

7. Grigorieva O. I. Effective technology of clearing woody and shrubby vegetation // O. I. Grigorieva, A. B Davtyan / Increasing the efficiency of forest complex: Proceedings of the Seventh All-Russian. national. scientific-practical conf. with international participation. Petrozavodsk, 2021.P. 34-35.- EDN: ZXLLFI- (In Russ.)- URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=zxlffi>.

8. Belyaev S. V. Current state and prospects of biomass application for biofuels / S. V. Belyaev, G. A. Davydkov, S. N. Persky // Actual issues of science and technology. 2015. P. 61-63.- EDN: TRCMYZ- (In Russ.)- URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23355865>.

9. Fokin, S.V. Ecological-saving technologies in the conduct of modern agroforestry measures / S.V. Fokin, O.N. Shportko, A.S. Burlakov // Scientific Life. 2017. № 7. P. 78-91.- EDN: ZHTTGX- (In Russ.)- URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30058020>.

10. Mokhirev A. P. Technological algorithm for production of products from felling residues / A. P. Mokhirev, K. P. Rukomoynikov, M. M. Gerasimova [et al.] // Izvestiyavysokikhkuchebnykhobrazovaniye. Forestry journal.2023. № 1 (391). P. 153—171.- DOI:10.37482/0536-1036-2023-1-153-171- (In Russ.)- URL: <https://journals.narfu.ru/index.php/fj/article/view/1343>.

11. Grigoriev I. V. Perspective directions of development work in forest machine building / I. V. Grigoriev, O. A. Kunitskaya // Increasing the efficiency of forestry complex: Proceedings of the Third All-Russian Scientific and Practical Conf. with international participation. Petrozavodsk, 2017.P. 53-56.- EDN: YTQUTK- (In Russ.)- URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32681201>.

12. Dobretsov, R. Yu. Problems and prospects for the use of forestry complex machines with a half-track / R. Yu. Dobretsov, A. S. Dmitriev, I. V. Grigoriev // Bulletin of AGATU. 2022.№ 4 (8).P. 95-105.- (In Russ.)- URL: <https://new.nlrs.ru/open/99671>.

13. Justice S., Biggs S. The spread of smaller engines and markets in machinery services in rural areas of South Asia // Journal of Rural Studies. 2020. Т. 73. P. 10–20. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.11.013>.

14. Liao W., Zeng F., Chanicebate M. Mechanization of Small-Scale Agriculture in China: Lessons for Enhancing Smallholder Access to Agricultural Machinery //Sustainability. – 2022. – Т. 14. – №. 13. – P. 7964. – DOI: <https://doi.org/10.3390/su14137964>.

15. Negrete J. C. Analysis of the current situation of two wheels tractors in Mexico //Horticult. Int J. – 2020. –Т. 4. – №. 1. – P. 28-33. – DOI: <https://doi.org/10.15406/hij.2020.04.00152>.

16. Peters M. D. J. et al. Scoping reviews: reinforcing and advancing the methodology and application //Systematic reviews. – 2021. – Т. 10. – №. 1. – P. 1-6. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s13643-021-01821-3>.

17. Rohani A. et al. Designing and modeling the power transmission mechanism for existing walking tractors to facilitate their guidance and turning //International Journal on Interactive Design and Manufacturing. – 2023. – Т. 10. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01516-0>.

18. Takeshima H. Custom-hired tractor services and returns to scale in smallholder agriculture: a production function approach // *Agricultural Economics*. – 2017. – Т. 48. – №. 3. – P. 363-372. – DOI: <https://doi.org/10.1111/agec.12339>.
19. Takeshima H., Nin-Pratt A., Diao X. Mechanization and agricultural technology evolution, agricultural intensification in sub-Saharan Africa: Typology of agricultural mechanization in Nigeria // *American Journal of Agricultural Economics*. – 2013. – Т. 95. – №. 5. – P. 1230-1236. – DOI: <https://doi.org/10.1093/ajae/aat045>.
20. Tangtong C. et al. Risk factors associated with hand tractor related injuries among rice farmers in Thai-land // *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. – 2022. – Т. 28. – №. 1. – P. 43-57. – DOI: <https://doi.org/10.1080/10807039.2021.2014301>.
21. Tikhonova E. V. V. Review of the subject field as a method of synthesizing scientific data / E. V. Tikhonova, N. M. Shlenskaya // *Storage and processing of agricultural raw materials*. - 2021. - № 3. - P. 11-25. - DOI 10.36107/spfp.2021.257. - EDN UUDXHJ.- (In Russ.) - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48003100>.
22. Shamsutdinova, A. I. Introduction of innovations in forestry of the Russian Federation and prospects for their development / A. I. Shamsutdinova, G. F. Ilalova, A. R. Mukhtarova // *Science of young people - the future of Russia : Collection of scientific articles of the 2nd International scientific conference of promising developments of young scientists*. In 5 volumes, Kursk, December 13-14, 2017 / Editor-in-Chief A.A. Gorokhov. Volume 5. - Kursk: Closed Joint Stock Company "Universitetskayakniga", 2017. - P. 211-213. - EDN YBBGRQ.- (In Russ.)- URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=31736899>.
23. Chebukova A. V. Methodological foundations of the implementation of "lean manufacturing" / A. V. Chebukova, G. R. Garipova, J. S. Chernyavskaya // *Quality in production and socio-economic systems: a collection of scientific articles / edited by A. V. Chebukova, G. R. Garipova, J. S. Chernyavskaya. 7th Intern.scientific and technical conf. Kursk, 2019. P. 188-190.- EDN: CSSHIT.- (In Russ.)- URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=csshit>.*
24. Kunitskaya O. Kunitskaya, O. A.; Makuev, V. A.; Storodubtseva, T. N. [et al.] // *Systems. Methods. Technologies*. 2022. № 4 (56). P. 57-63.- EDN: OHGHQS.- (In Russ.)- URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49848720>.
25. Fokin S.V. About the main types of energy wood /Fokin S.V., Fomina O.A. // In collection: *Forest Engineering. materials of scientific and practical conference with international participation*. 2018. P. 273-276.- EDN: SMBQRR-(In Russ.)-<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35278500>.
26. Golyakevich, S.A. Analysis and perspectives of forestry equipment use in natural and production conditions of the Republic of Belarus / S.A. Golyakevich // *Proceedings of the Belarusian State Technical University. Series 1: Forestry, nature management and processing of renewable resources*. 2021. № 2 (246). P. 188-195.- EDN: WYNXGI- DOI: 10.52065/2519-402X-2021-246-23-188-195- (In Russ.)- URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46408166>.
27. Fokin, S.V.Fokin, O.A.Fomina / S.V.Fokin, O.A.Fomina // *Scientific Life*. 2018. № 2. P. 10-15. .- EDN: YVTTJL- (In Russ.)- URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32788506>.
28. Varol T. et al. Efficiency Comparison of Mechanization Techniques in Nursery // *European Journal of Forest Engineering*. – 2019. – Т. 5. – №. 2. – P. 68-76. – DOI: <https://doi.org/10.33904/ejfe.581652>.
29. Fokin, S.V. About constructive schemes of raw material feeding to the chopper in disk chopping machines / S.V. Fokin, O.N. Shportko // in *Proceedings of the scientific and technical conference with international participation named after A.F. Ulyanov. "Innovative technical support of agroindustrialcomplex". Saratov, Vavilov University, 2023. P. 255-259.- EDN: UXRMC A- (In Russ.)- URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=uxrmca>.*
30. Zhang X., Yang J., Thomas R. Mechanization outsourcing clusters and division of labor in Chinese agriculture // *China Economic Review*. – 2017. – Т. 43. – P. 184-195. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chieco.2017.01.012>.
31. Fokin S.V. To the issue of wood waste processing at the enterprises of agro-industrial complex / S.V. Fokin, O.N. Shportko, K.S. Manyshev // *Proceedings of the II International Scientific and Practical Internet Conference "Modern ecological state of the natural environment and scientific and practical aspects of rational nature management"*. FGBNU

"Caspian Research Institute of Arid Agriculture". 2017. P. 1822-1825.- EDN: ZANRSL- (In Russ.)- URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29727486>.

32. Myasishchev, D. G. Optimization of design parameters of the system "working body - motor chassis" for shredding of ground cover / D. G. Myasishchev, S. A. Putintsev // *Izvestiya St. Petersburg Forestry Academy*. - 2016. - № 215. - P. 149-162. - DOI 10.21266/2079-4304.2016.215.149-162. - EDN WAXWCF. - (In Russ.)- URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26180945>.

33. Myasishchev, D.G. Potential of small mechanization in forestry technological processes / D.G. Myasishchev // *Izvestiyavysokikhkuchebnykhkuchebnykhobrazovaniye*. Forestry journal. - 2018. - № 1(361). - P. 70-79. - DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.1.70. - EDN YNMFBS. - (In Russ.)- URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32367561>.

34. Djordjevich S.J., Djordjevich-Miloshevich S.B., Miloshevich S.M. Assessment of Conditions and Experience for Plantation of Agro-Energy Crops on Degraded Agricultural Land in Serbia // *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering*. 2016. Vol. 10(7). P. 447-50.-DOI: [doi.org/10.5281/zenodo.1125827](https://doi.org/10.5281/zenodo.1125827)- URL:<https://publications.waset.org/10005064>.

35. Yakimov, V. A. Experimental study of forest seeding unit based on motorized chassis / V. A. Yakimov, D. G. Myasishchev // *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*. - 2014. - T. 2, № 3-4(8-4). - P. 95-98. - DOI 10.12737/4347. - EDN SHVQVL. -(In Russ.)- URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21744407>.

36. Zarovnyaev T. D. Technological process for recycling of logging waste / T. D. Zarovnyaev, E. I. Nikitina, O. A. Kunitskaya // *Modern problems and achievements of agrarian science in the Arctic: Collection of scientific articles on the materials of the All-Russian student scientific-practical conference with international participation in the framework of the "Northern Forum - 2020" (September 29-30, 2020, Yakutsk) and the International Scientific Online Summer School - 2020 (July 6-20, 2020, Yakutsk)*. Yakutsk, 2020.P. 107-114.- EDN: QJTFUA- (In Russ.)- URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=qjtfua>.

37. Novikov A. I. Experience in the application of alternative energy sources in the transport and technological complex / A. I. Novikov // *Alternative energy sources in the transport and technological complex: problems and prospects of rational use*. - 2014. - T. 1, № 1 (1). - P. 62-65. - EDN: TJQQLD -(In Russ.)- URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23015125>

38. Stolbin V. S. Analysis of scientific research in the field of assessing the environmental impact of forestry machines and technologies on forest ecosystems / V. S. Stolbin, S. A. Golyakevich // *Proceedings of BSTU. S. Analysis of scientific research in the field of assessing the environmental impact of forest machines and technologies on forest ecosystems / V. S. Stolbin, S. A. Golyakevich // Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, nature management and processing of renewable resources*. - 2020. - № 2(234). - P. 149-159. - EDN: NOYHHM-(In Russ.)- URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43937082>.

39. Kotelnikov N. V. V. Feasibility study of the project for the implementation of biofuel boiler for the utilization of wood felling residues / N. V. Kotelnikov, E. V. Pruidze, S. P. Gagunov // *Baikal Science: ideas, innovations, investments*. Irkutsk, 2019.P. 14-20.- EDN: NRPZAQ- (In Russ.)- URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42573994>.

40. Grigoriev V. I. Forest plantations in the Asia-Pacific region / V. I. Grigoriev // in *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists "Science and Innovation: vectors of development"*, Barnaul, October 24-25, 2018. P. 75-78. - EDN: RZXKVD - (In Russ.). - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37324863>.

41. Mokhiev A.P. Technological algorithm for production of products from felling residues / A.P. Mokhiev, K.P. Rukomoynikov, M.M. Gerasimova, S.O. Medvedev, M.A. Zyryanov // *Izv. of universities. Lesn. zhurn*. 2023. № 1. C. 153-171.- EDN: RMNTFL- DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-153-171>-(In Russ.)-URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=rmntfl>.

42. Lyubov V.K. Increasing the efficiency of energy utilization of biofuel / V.K. Lyubov, I.I. Tsypnyatov // *Izv. of higher education institutions. Lesn. zhurn.* 2023. № 1. С. 172-185.- EDN: JSRLL0- DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-172-185>- (In Russ.)- URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50260969>.

43. Shegelman, I.R. Typization of forest areas by natural and production conditions on the basis of cluster analysis / I.R. Shegelman, P.V. Budnik // *Iz.VUZ Forestry Journal*, 2021. № 1. С. 120-137.- EDN: XORRKH-(In Russ.)- DOI: 10.17238/issn0536-1036- URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44729465>.

44. Patent for utility model No. 221 248 U1 , IPC B27L 11/00 (2006.01),A01G 23/00 (2006.01), SPC B27L 11/00 (2023.08), A01G 23/00 (2023.08) Device for chopping felling residues / Fokin S. V, MedvedevaP.Yu.; applicant and patentee FGBOU VO Vavilov University. - No. 2023123326; application.08.09.2023; publ. 26.10.2023 Bul. No. 30.- (In Russ.).

45. Malyukov, S. V. Analysis of designs and operating modes of disk chopping machines / S. V. Malyukov, A. A. Aksenov, M. A. Malyukova // *Lesotechnical Journal*. - 2021. - Т. 11, № 4(44). - С. 139-149. - (In Russ.)- DOI 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/12. - <https://elibrary.ru/xknnup>.

### Сведения об авторах

✉ *Фокин Сергей Владимирович* – д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова», пр-кт им. Петра Столыпина, зд. 4, стр. 3, г. Саратов, Российская Федерация, 410012, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9575-7764>, e-mail: [feht@mail.ru](mailto:feht@mail.ru).

*Медведева Полина Юрьевна* – аспирант, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова», пр-кт им. Петра Столыпина, зд. 4, стр. 3, г. Саратов, Российская Федерация, 410012, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9708-4182>, e-mail: [pelageam@mail.ru](mailto:pelageam@mail.ru).

*Попиков Виктор Петрович* – к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2499-2772>, e-mail: [kafedra.laip@inbox.ru](mailto:kafedra.laip@inbox.ru).

### Information about the authors

✉ *Sergey V. Fokin* – Doctor of Technical Sciences, Professor, N.I. Vavilov Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering, Petr Stolypin Ave., zd. 4, p. 3., Saratov, Russian Federation, 410012, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9575-7764>, e-mail: [feht@mail.ru](mailto:feht@mail.ru).

*Polina Yu. Medvedeva* – postgraduate student, N.I. Vavilov Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering, Petr Stolypin Ave., zd. 4, p. 3., Saratov, Russian Federation, 410012, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9708-4182>, e-mail: [pelageam@mail.ru](mailto:pelageam@mail.ru).

*Victor P. Popikov* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2499-2772>, e-mail: [kafedra.laip@inbox.ru](mailto:kafedra.laip@inbox.ru).

✉- Для контактов/Corresponding author



Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/7>

УДК 624.138.232



## Структурные прочностные характеристики фиброцементогрунта в дорожной одежде лесовозных автомобильных дорог Свердловской области

Сергей А. Чудинов , [chudinovsa@m.usfeu.ru](mailto:chudinovsa@m.usfeu.ru),  <https://orcid.org/0000-0003-4492-8188>

ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», ул. Сибирский тракт, 37,  
г. Екатеринбург, 620100, Российская Федерация

Решением задачи повышения эффективности технологии укрепления грунтов конструкций лесовозных автомобильных дорог может быть дисперсное армирование цементогрунтовой матрицы волокнами фибры. Получаемый при этом композиционный материал – фиброцементогрунт в условиях лесной зоны обладает повышенными прочностными показателями и трещиностойкостью. В целях исследования структурных прочностных характеристик фиброцементогрунта: угла внутреннего трения и удельного коэффициента сцепления, проведены лабораторные исследования на установке одноплоскостного среза ГТ 0.2.1. Образцы фиброцементогрунта изготовлены на основе природного грунта из земляного полотна лесовозной автомобильной дороги в Свердловской области с содержанием 2 %, 4 %, 6 % портландцемента и 0 %, 0,75 %, 1,5 % фиброволокна на основе отходов производства базальтовых теплоизоляционных плит. Определены структурные прочностные характеристики и установлено, что добавка базальтового фиброволокна в составе фиброцементогрунта влияет при уровне значимости  $p = 0,000026$  на угол внутреннего трения и при  $p = 0,000016$  на удельный коэффициент сцепления в зависимости от содержания портландцемента. При содержании 2 % портландцемента, добавка 1,5 % базальтового фиброволокна снижает удельный коэффициент сцепления на 8 % (10 кПа) и угол внутреннего трения на  $1^\circ$ , в силу недостаточного развития цементогрунтовой матрицы фиброцементогрунта. При содержании 6 % портландцемента, добавка 1,5 % базальтового фиброволокна увеличивает коэффициент сцепления на 43 % (258,7 кПа) и угол внутреннего трения на  $2^\circ$ , в связи с удержанием в цементогрунтовой матрице и восприятием внешних нагрузок фиброволокном за счет осевого растяжения. Полученные показатели удельного сцепления и угла внутреннего трения целесообразно использовать для моделирования и расчета конструкций дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта методом конечных элементов с учетом нагрузок от лесотранспорта и сложных природных условий лесной зоны.

**Ключевые слова:** лесовозная автомобильная дорога, фиброцементогрунт, укрепление грунта, дорожная одежда, угол внутреннего трения, удельный коэффициент сцепления, дисперсное армирование

**Финансирование:** данное исследование не получало внешнего финансирования.

**Благодарности:** автор благодарит рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.


**Для цитирования:** Чудинов, С. А. Структурные прочностные характеристики фиброцементогрунта в дорожной одежде лесовозных автомобильных дорог Свердловской области / С. А. Чудинов // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 14. – № 1 (53). – С. 116–133. – Библиогр.: с. 128–132 (34 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/7>.

Поступила 27.12.2023. Пересмотрена 30.01.2024. Принята 12.02.2024. Опубликовано онлайн 20.03.2024.



Article

## Structural strength characteristics of fiber cement soil in road pavement of timber roads in the Sverdlovsk region

Sergey A. Chudinov ✉, chudinovsa@m.usfeu.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-4492-8188>

Ural State Forestry Engineering University, st. Siberian Tract, 37, Ekaterinburg, 620100, Russian Federation

### Abstract

The solution to the problem of increasing the efficiency of the technology for strengthening soils of logging highway structures can be dispersed reinforcement of the cement-soil matrix with fiber. The resulting composite material, fiber cement soil, in the forest zone has increased strength properties and crack resistance. In order to study the structural strength characteristics of fiber cement soil: the angle of internal friction and the specific coefficient of adhesion, laboratory studies were carried out using a single-plane cutting unit GT 0.2.1. Samples of fiber cement soil were made on the basis of natural soil from the subgrade of a logging road in the Sverdlovsk region containing 2 %, 4 %, 6 % Portland cement and 0 %, 0.75 %, 1.5 % fiber based on waste from the production of basalt thermal insulation boards. Structural strength characteristics were determined and it was found that the addition of basalt fiber in the composition of fiber cement soil affects the angle of internal friction at a significance level of  $p = 0.000026$  and at  $p = 0.000016$  the specific coefficient of adhesion depending on the content of Portland cement. With a content of 2 % Portland cement, the addition of 1.5 % basalt fiber reduces the specific coefficient of adhesion by 8 % (10 kPa) and the angle of internal friction by  $1^\circ$ , due to the insufficient development of the cement-soil matrix of the fiber-cement soil. With a content of 6% Portland cement, the addition of 1.5 % basalt fiber increases the adhesion coefficient by 43 % (258.7 kPa) and the angle of internal friction by  $2^\circ$ , due to retention in the cement-soil matrix and the perception of external loads by the fiber due to axial tension. It is advisable to use the obtained indicators of specific adhesion and angle of internal friction for modeling and calculating road pavement structures for logging roads made of fiber cement soil using the finite element method, taking into account loads from timber transport and difficult natural conditions of the forest zone.

**Keywords:** logging road, fiber cement soil, soil strengthening, road pavement, angle of internal friction, specific coefficient of adhesion, dispersed reinforcement

**Funding:** this research received no external funding.

**Acknowledgments:** author thanks the reviewers for their contribution to the peer review.

**Conflict of interest:** the author declares no conflict of interest.

**For citation:** Chudinov S. A. (2024). Structural strength characteristics of fiber cement soil in road pavement of logging roads in the Sverdlovsk region. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 1 (53), pp. 116-133 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/7>.

*Received* 27.12.2023. *Revised* 30.01.2024. *Accepted* 12.02.2024. *Published online* 20.03.2024.

### Введение

Надежность функционирования лесовозных автомобильных дорог в смешанных лесах Свердловской области определяет эффективность транспортного освоения лесосырьевых баз, а значит и разви-

тие лесопромышленной отрасли в целом. Лесовозные автомобильные дороги должны обеспечивать транспортировку лесоматериалов в соответствии с нормативными показателями грузооборота при требуемых прочностных и транспортно-эксплуатационных показателях покрытия дорожной одежды.

В данном случае будет обеспечиваться бесперебойная транспортировка лесоматериалов с максимальной скоростью и минимальными транспортными затратами [4, 6].

Инертные материалы: песок, щебень, щебеночно-песчаные смеси, гравийно-песчаные смеси, являются традиционными и активно используемыми дорожно-строительными материалами для устройства конструктивных слоев лесовозных автомобильных дорог. Их применение обусловлено высокой производственной и эксплуатационной технологичностью, при отсутствии необходимости в использовании специфичных видов дорожно-строительной техники и оборудования.

Однако, как правило, в районах освоения лесосырьевых баз отсутствуют поставщики дорожно-строительных инертных материалов. Это вызывает необходимость осуществлять доставку данных материалов на длительные расстояния и приводит в конечном итоге к значительному удорожанию сметной стоимости строительства лесовозных автомобильных дорог [2].

Одной из эффективных технологий строительства лесовозных автомобильных дорог, обеспечивающей высокие прочностные и транспортно-эксплуатационные показатели, является устройство конструктивных слоев дорожных одежд из местных укрепленных грунтов [1, 10, 18]. При укреплении грунтов в качестве основного компонента используется местный грунт, при этом в конструкции дорожной одежды инертные материалы не используются, либо используются в незначительном количестве. В связи с этим, применение технологии укрепления грунтов для строительства лесовозных автомобильных дорог является актуальным, обеспечивающее низкую стоимость строительства, в особенности в районах с недостатком природных каменных материалов [14, 22, 34].

Для укрепления грунтов конструкций лесовозных автомобильных дорог используют различные минеральные вяжущие и отходы промышленного производства [3, 13, 31]. Наиболее распространенным минеральным вяжущим, используемым для укрепления грунтов, является портландцемент. Цементогрунты подобранных составов с добавками активных компонентов, повышающих эффективность

структурообразования материала, обеспечивают требуемые прочностные показатели и морозостойкость [5, 15, 33]. Однако в сложных природных условиях лесной зоны, характеризующихся распространением слабых, переувлажненных грунтов в основании лесовозных автомобильных дорог, цементогрунты обладают низкой трещиностойкостью [16, 30]. Низкая трещиностойкость цементогрунтовых слоев проявляется в виде сетки продольных и поперечных трещин, снижая срок службы дорожной одежды в результате попадания в трещины влаги и накопления остаточных деформаций от воздействия грузового транспорта, осуществляющего транспортировку древесных материалов.

Таким образом, актуальным является разработка технологических решений по улучшению эффективности укрепления грунтов портландцементом для достижения высоких прочностных показателей и трещиностойкости слоев конструкций дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог. Одной из перспективных является технология дисперсного армирования волокнами фибры цементогрунтовых смесей [26, 29, 32]. Получаемый таким образом композиционный материал – фиброцементогрунт обладает повышенными физико-механическими показателями и трещиностойкостью по сравнению с цементогрунтом, в особенности для его применения в условиях лесной зоны и значительных нагрузок от лесотранспортных машин на дорожное полотно [20, 27].

Для приготовления фиброцементогрунтовых смесей возможно использовать базальтовые, стеклянные, углеродные или пропиленовые волокна [25]. Распределенные по всему объему фиброцементогрунтовой смеси волокна фибры, в процессе твердения портландцемента, удерживаются внутри цементогрунтовой матрицы, и дисперсно армируют материал, воспринимая посредством своего осевого растяжения воздействие внешних нагрузок и увеличивая таким образом прочностные и деформационные показатели данного композиционного материала [21, 23, 28].

В работах [11, 12, 17] приведены составы, а также результаты лабораторных исследований фиброцементогрунтовой смеси с различными видами фибры по показателям: водонасыщения, предела

прочности при сжатии, предела прочности при изгибе, предела прочности при раскалывании и морозостойкости. Согласно полученным данным, фиброцементогрунты имеют более высокие прочностные показатели и морозостойкость, а также низкое водонасыщение, по сравнению с аналогичными образцами из цементогрунта без добавки фибры.

В целях моделирования, конструирования и расчета конструкций дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунтовых слоев для условий лесной зоны и транспортных нагрузок от лесотранспортных машин, требуются показатели основных характеристик структурной прочности материала, а именно: угол внутреннего трения и удельное сцепление. Анализ приведенных выше научных работ показал, что данным исследованиям уделено не достаточное внимание.

Целью настоящей работы является исследование влияния добавок портландцемента и фиброволокна на структурные прочностные характеристики – угол внутреннего трения и удельное сцепление –

фиброцементогрунтов в условиях смешанных лесов Свердловской области.

### Материалы и методы

#### Объект и предмет исследований

Объект исследования: конструктивные слои дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта.

Предмет исследования: структурные прочностные характеристики фиброцементогрунта: угол внутреннего трения и удельное сцепление.

#### Дизайн эксперимента

Для проведения лабораторных испытаний изготовлены образцы в соответствии с ГОСТ Р 70452-2022 «Грунты стабилизированные и укрепленные неорганическими вяжущими. Общие технические условия». На каждый состав смеси укрепленного грунта изготовлено по 3 образца диаметром 71 мм и высотой 35 мм (рис. 1). Перед испытанием, срок набора прочности образцов составил 28 суток твердения во влажных условиях в эксикаторе.

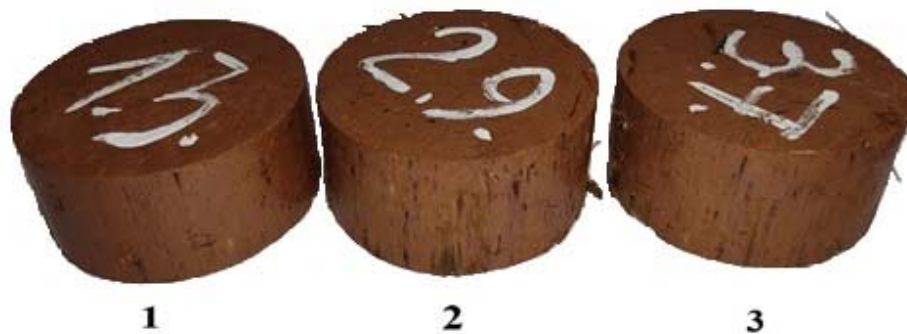


Рисунок 1. Образцы укрепленных грунтов для проведения испытаний:

- 1 (образец № 1.3) – цементогрунт с содержанием 2 % портландцемента от массы сухого грунта, без фибры;  
2 (образец № 2.9) – фиброцементогрунт с содержанием 4 % портландцемента и 1,5 % фиброволокна от массы сухого грунта;  
3 (образец № 3.7) – фиброцементогрунт с содержанием 6 % портландцемента и 1,5 % фиброволокна от массы сухого грунта

Figure 1. Samples of strengthened soils for testing:

- 1 (sample No. 1.3) – cement soil containing 2 % Portland cement by weight of dry soil, without fiber;  
2 (sample No. 2.9) – fiber cement soil containing 4 % Portland cement and 1.5 % fiber fiber by weight of dry soil;  
3 (sample No. 3.7) – fiber cement soil containing 6 % Portland cement and 1.5 % fiber fiber by weight of dry soil

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

Приготовление фиброцементогрунтовых смесей осуществлялось на основе природного грунта – суглинка тяжелого песчанистого (табл. 1),

взятого из земляного полотна лесовозной автомобильной дороги на территории ГКУ СО «Карпинское лесничество» в Свердловской области, обслуживаемой ООО «ОУС Леском».

Таблица 1

Характеристики природного грунта для приготовления фиброцементогрунтовых смесей

Table 1

Characteristics of natural soil for the preparation of fiber cement soil mixtures

Наименование грунта   Soil name	Удельный вес грунта, т/м <sup>3</sup>   Specific gravity of soil, t/m <sup>3</sup>	Влажность на границе текучести, % по массе   Moisture at the yield point, % by weight	Влажность на границе раскатывания, % по массе   Humidity at the rolling boundary, % by weight	Число пластичности   Plasticity number	Оптимальная влажность, % по массе   Optimal humidity, % by weight	pH грунта   Soil pH	Содержание гумусовых веществ   Content of humic substances
Суглинок тяжелый песчанистый   Heavy sandy loam	1,48	26	13	13	15	6,5	1,8

Источник: собственные вычисления автора  
Source: own calculations

В составе фиброцементогрунтовых смесей использован портландцемент ЦЕМ II/В-И 32,5Б по ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные. Технические условия» и вода по ГОСТ 51232-98 «Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества». В качестве добавки фибры использовалось базальтовое волокно, взятое из отходов производства базальтовых теплоизоляционных плит АО «Тизол» в г. Нижняя Тура Свердловской области. Благодаря высокой прочности на растяжение – 2100 МПа и химической стойкости в кислотно-щелочных средах, базальтовое фиброволно можно эффективно использовать в качестве дисперсно-армирующей добавки в фиброцементогрунтах [7-9].

Для испытаний были изготовлены серии образцов фиброцементогрунтов различных составов, представленных в табл. 2. На основании проведенных исследований прочностных показателей фиброцементогрунтов данных составов, оптимальное содержание фиброволокна составляет 1,5 % от массы сухого грунта. При содержании портландцемента 6 % от массы сухого грунта достигаются прочност-

ные показатели, обеспечивающие возможность использования фиброцементогрунта в слоях оснований лесовозных автомобильных дорог.

Приготовление каждого состава фиброцементогрунтовой смеси осуществлялось в следующей последовательности:

1. Высушивание грунта в сушильном шкафу при температуре  $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$  до постоянной массы и охлаждение на воздухе до температуры  $(22 \pm 3)^\circ\text{C}$ .
2. Растирание сухого грунта в фарфоровой ступке пестиком с резиновым наконечником. Максимальный размер частиц грунта составил менее 16 мм.
3. Перемешивание навески сухого грунта массой не менее 15 кг с портландцементом в заданных пропорциях до однородного состояния.
4. Добавление в смесь сухого грунта и портландцемента воды до оптимальной влажности и перемешивание до однородного состояния. Оптимальная влажность каждого состава фиброцементогрунтовых смесей определялась в соответствии с ГОСТ Р 70456-2022 «Грунты. Определение оптимальной влажности и максимальной плотности методом Проктора». В связи с тем, что составы укрепленных

грунтов имеют различное содержание портландцемента (от 2,0 % до 6,0 % от массы сухого грунта), значения оптимальной влажности и требуемое количество воды изменялось соответственно от 15,0 % до 16,0 % от массы сухого грунта.

5. Добавление в смесь цементогрунтовой смеси фиброволокна в заданных пропорциях и перемешивание до однородного состояния.

Таблица 2

Составы фиброцементогрунтовых смесей

Table 2

Compositions of fiber cement-soil mixtures

Компоненты состава, % от массы сухого грунта   Components of the composition, % by weight of dry soil	Составы фиброцементогрунта   Compositions of fiber cement soil								
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8	№ 9
Портландцемент ЦЕМ II/В-И 32,5Б   Portland cement СЕМ II/B-I 32.5B	2,0	2,0	2,0	4,0	4,0	4,0	6,0	6,0	6,0
Фиброволокно базальтовое (отход производства базальтовых теплоизоляционных плит)   Fiber basalt (waste from the production of basalt thermal insulation boards)	0	0,75	1,5	0	0,75	1,5	0	0,75	1,5
Вода   Water	15,0	15,0	15,0	15,5	15,5	15,5	16,0	16,0	16,0

Примечание: Расчет массы добавляемых компонентов: портландцемента, фиброволокна и воды, производился относительно массы навески сухого грунта и заданного содержания добавок (% от массы сухого грунта) в зависимости от состава фиброцементогрунтовых смесей

Note: The calculation of the mass of the added components: Portland cement, fiber and water was carried out relative to the mass of a sample of dry soil and the specified content of additives (% of the mass of dry soil) depending on the composition of the fiber cement soil mixtures

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Исследования по изучению показателей угла внутреннего трения и удельного сцепления фиброцементогрунта проводились в соответствии с ГОСТ 12248.1-2020 «Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза» на установке одноплоскостного среза ГТ 0.2.1. Испытания проводились по 3 образцам на каждый состав укрепленного грунта, нагруженных нормальной к плоскости среза нагрузкой (нормальное давление), увеличиваемой ступенями: 0,1 МПа; 0,2 МПа; 0,3 МПа. Путем регистрации сопротивления срезу образцов на каждой ступени нормального давления, рассчитаны показатели угла внутреннего трения и удельного сцепления составов фиброцементогрунта.

С целью разработки математических моделей структурных прочностных характеристик: угла внутреннего трения и удельного сцепления, в зависимости от количества компонентов фиброцементогрунтовой смеси: портландцемента и фиброволокна, использовано математическое планирование эксперимента (DOE). Для описания поверхностей отклика: угла внутреннего трения и удельного сцепления, полиномом второго порядка был принят полный факторный план  $3^2$ . Матрица плана в безразмерных кодированных величинах представлена в табл. 3.

Координаты центра плана, интервалы варьирования и уровни исследования приведены в табл. 4.

Таблица 3

Матрица планирования эксперимента

Table 3

Experiment planning matrix

№ опыта   Experience no.	Кодированные значения факторов   Coded factor values	
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>
1	-1	-1
2	-1	0
3	-1	+1
4	0	-1
5	0	0
6	0	+1
7	+1	-1
8	+1	0
9	+1	+1

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Таблица 4

Уровни варьирования переменных факторов

Table 4

Levels of variation of variable factors

Факторы   Factors	Размерность   Dimension	Обозначение факторов   Designation of factors	Основной уровень   Main level	Шаг варьирования   Variation step	Верхний уровень   Top level	Нижний уровень   Lower level
			0		+1	-1
Содержание портландцемента (от массы сухого грунта)   Portland cement content (based on dry soil weight)	%	X <sub>1</sub>	4	2	6	2
Содержание фиброволокна базальтового (от массы сухого грунта)   Basalt fiber content (based on dry soil weight)	%	X <sub>2</sub>	0,75	0,75	1,5	0

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

### Анализ данных

Статистический анализ и визуализация полученных результатов структурных прочностных характеристик фиброцементогрунта различного состава производился в программном комплексе Statistica 10 (TIBCO Software Inc., США).

Для изучения связи между переменными проведен регрессионный анализ. Исследована значимость регрессии и адекватность построенных моделей исходным данным. Для оценки степени адекват-

ности построенных моделей проведен анализ остатков модели по разности между наблюдаемыми и предсказываемыми значениями угла внутреннего трения и удельного сцепления. Кроме того, статистическая значимость уравнения регрессии эксперименту проверялась по F-критерию Фишера.

### Результаты

На основании DOE получено уравнение регрессии

$$C(X) = -117,4344 + 118,3392X_1 - 121,64X_2 + 0,3792X_1^2 + 44,7833X_1X_2 + 16,9896X_2^2 \quad (1)$$

где  $C(X)$  – удельное сцепление, кПа;

$X_1$  – содержание портландцемента, % от массы сухого грунта;

$X_2$  – содержание фиброволокна базальтового, % от массы сухого грунта

адекватно (критерий адекватности Фишера = 98,40529,  $p = 0,000026$ ) описывающее экспериментальные данные удельного сцепления фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна при оптимальном содержании воды (рис. 2).

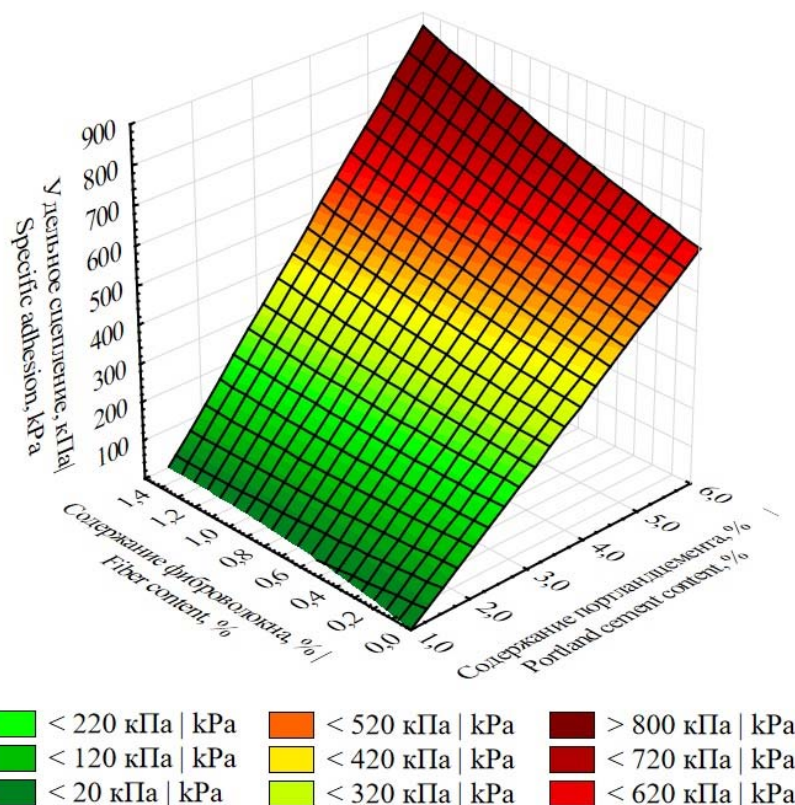


Рисунок 2. Поверхность отклика удельного сцепления фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна при оптимальном содержании воды

Figure 2. Response surface of the specific adhesion of fiber cement soil depending on the content of Portland cement and fiber at optimal water content

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

Нормальный вероятностный график остатков удельного сцепления фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна при оптимальном содержании воды свидетельствует, что остатки достаточно хорошо ложатся на нормальную прямую (рис. 3). На диаграмме рассеяния предсказанных значений и остатков (рис. 4) нет резко выделяющихся остатков. Оценка адекват-

ности модели (1) с помощью остатков свидетельствует о том, что модель удельного сцепления фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна при оптимальном содержании воды адекватно описывает данные эксперимента.

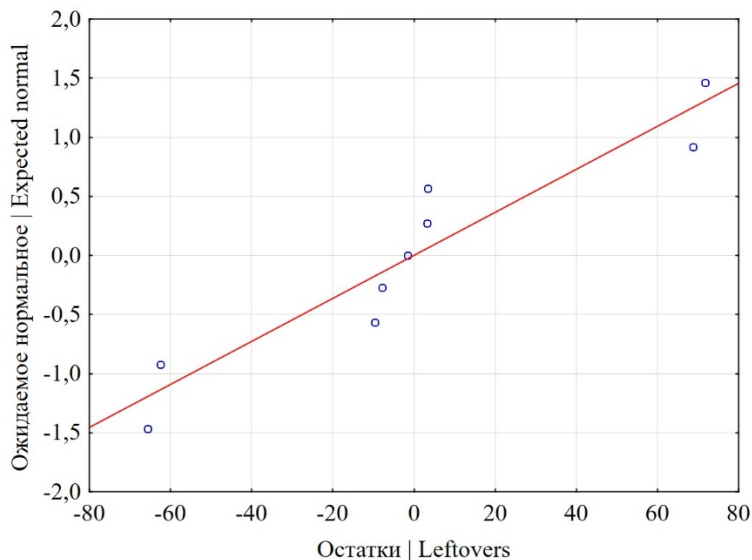


Рисунок 3. Нормальный вероятностный график остатков удельного сцепления фиброцементогрунт в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна при оптимальном содержании воды

Figure 3. Normal probability graph of the residual specific cohesion of fiber cement soil depending on the content of Portland cement and fiber at optimal water content

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

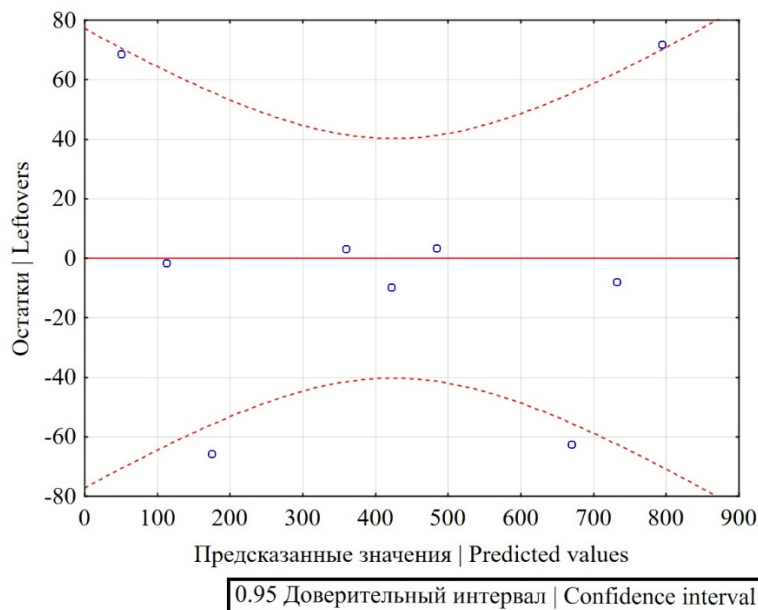


Рисунок 4. Диаграмма рассеяния предсказанных значений и остатков удельного сцепления фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна при оптимальном содержании воды

Figure 4. Scatter plot of predicted values and residuals of specific cohesion of fiber cement soil as a function of Portland cement and fiber content at optimal water content

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition



Согласно полученным экспериментальным данным, образцы с содержанием 2 % портландцемента и 1,5 % фиброволокна имеют показатель удельного сцепления 108,7 кПа, что на 8 % меньше, чем у аналогичных образцов без фиброволокна. При содержании 4 % портландцемента, показатель удельного сцепления образцов с 1,5 % фиброволокна составляет 487,70 кПа, что на 34 % больше, чем у образцов без фиброволокна. При содержании 6 % портландцемента, показатель удельного сцепления образцов с 1,5 % фиброволокна составляет 866,0 кПа, что на 43 % больше, чем у образцов без фиброволокна.

На основании DOE получено уравнение регрессии

$$\varphi(X) = 15,8735 + 2,3529X_1 - 1,6952X_2 - 0,1223X_1^2 + 0,3669X_1X_2 + 0,2986X_2^2 \quad (2)$$

где  $\varphi(X)$  – угол внутреннего трения, градусы (°);

$X_1$  – содержание портландцемента, % от массы сухого грунта;

$X_2$  – содержание фиброволокна базальтового, % от массы сухого грунта

адекватно (критерий адекватности Фишера = 107,869565,  $p = 0,000016$ ) описывающее экспериментальные данные угла внутреннего трения фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна при оптимальном содержании воды (рис. 5).

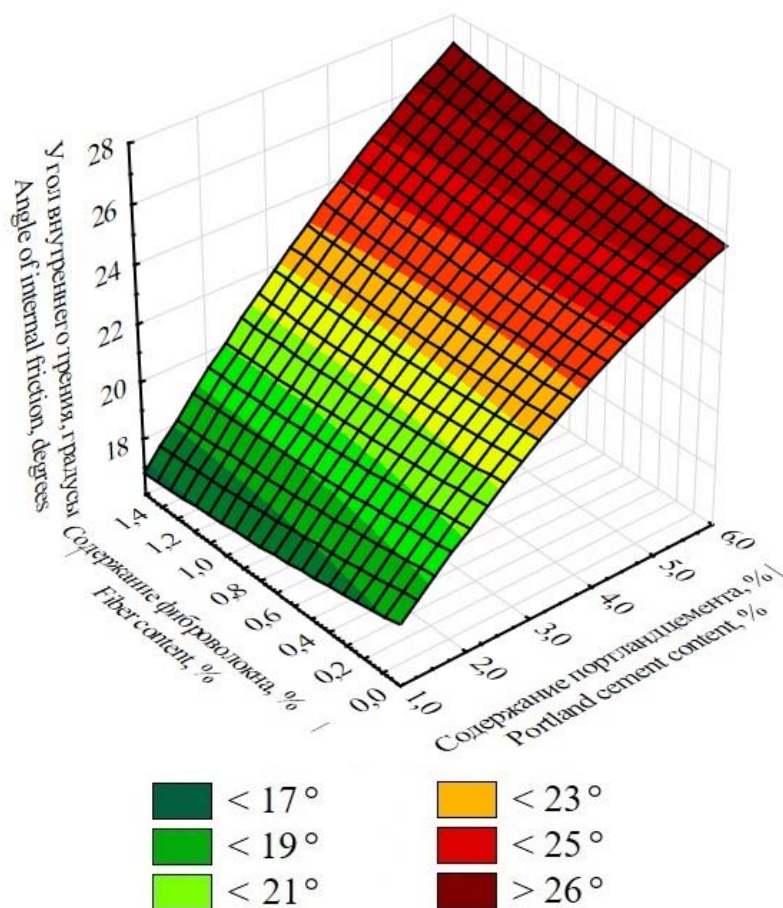


Рисунок 5. Поверхность отклика угла внутреннего трения фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна при оптимальном содержании воды

Figure 5. Response surface of the angle of internal friction of fiber cement soil depending on the content of Portland cement and fiber at optimal water content

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

Нормальный вероятностный график остатков угла внутреннего трения фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна при оптимальном содержании воды свидетельствует, что остатки достаточно хорошо ложатся на нормальную прямую (рис. 6). На диаграмме рассеяния предсказанных значений и остатков (рис. 7) нет резко выделяющихся остатков.

Оценка адекватности модели (2) с помощью остатков свидетельствует о том, что модель угла внутреннего трения фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна при оптимальном содержании воды адекватно описывает данные эксперимента.

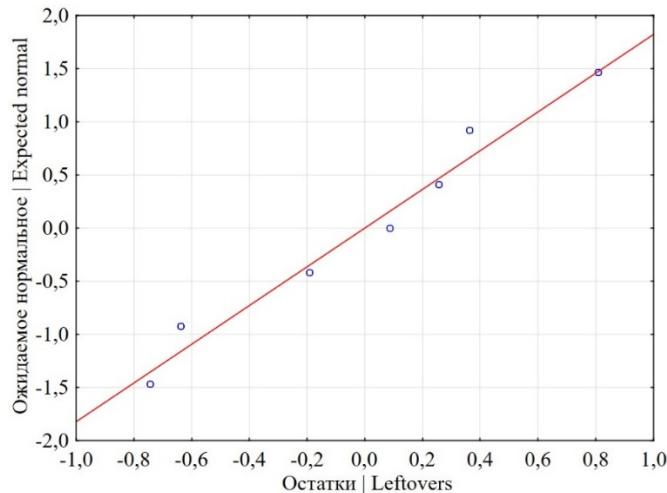


Рисунок 6. Нормальный вероятностный график остатков угла внутреннего трения фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна при оптимальном содержании воды  
Figure 6. Normal probability graph of the residual angle of internal friction of fiber cement soil depending on the content of Portland cement and fiber at optimal water content

Источник: собственная композиция автора  
Source: author's composition

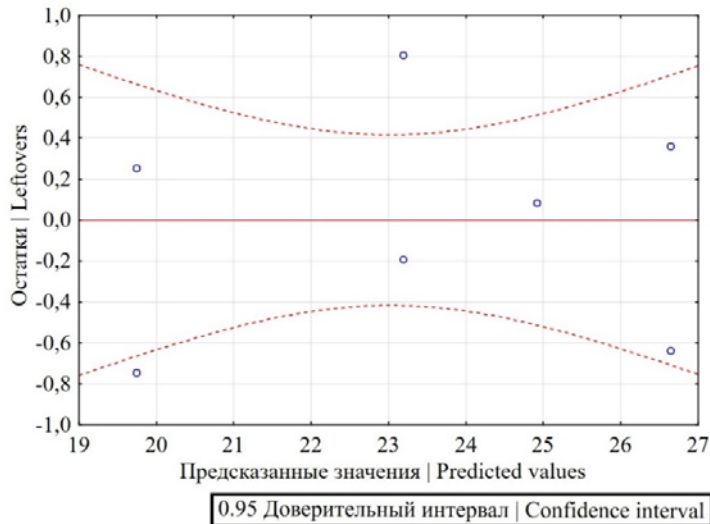


Рисунок 7. Диаграмма рассеяния предсказанных значений и остатков угла внутреннего трения фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна при оптимальном содержании воды

Figure 7. Scatter diagram of predicted values and residuals of the angle of internal friction of fiber cement soil depending on the content of Portland cement and fiber at optimal water content

Источник: собственная композиция автора  
Source: author's composition

Согласно полученным экспериментальным данным, образцы с содержанием 2 % портландцемента и 1,5 % фиброволокна имеют показатель угла внутреннего трения  $19^\circ$ , что на  $1^\circ$  меньше, чем у образцов без фиброволокна. При содержании 4 % портландцемента, показатель угла внутреннего трения образцов с 1,5 % фиброволокна составляет  $24^\circ$ , что на  $1^\circ$  больше, чем у образцов без фиброволокна. При содержании 6 % портландцемента, показатель угла внутреннего трения образцов с 1,5 % фиброволокна составляет  $27^\circ$ , что на  $2^\circ$  больше, чем у образцов без фиброволокна.

### Обсуждение

В результате исследований установлено, что в зависимости от содержания портландцемента добавка фибры на основе базальтовых волокон в составе фиброцементогрунта влияет на структурные прочностные характеристики: удельное сцепление и угол внутреннего трения. Полученные зависимости структурных прочностных показателей позволили установить, что увеличение от 0 % до 1,5 % добавки фиброволокна повышает значения удельного сцепления и угла внутреннего трения фиброцементогрунтовых образцов при содержании более 2 % портландцемента.

При содержании менее 2 % портландцемента добавка фиброволокна приводит к уменьшению удельного сцепления и угла внутреннего трения. Данное обстоятельство объясняется, тем, что при незначительном содержании портландцемента происходит слабое развитие кристаллизационной структуры фиброцементогрунта. В данных условиях волокна фибры не удерживаются внутри цементогрунтовой матрицы и не воспринимают внешние нагрузки за счет осевого растяжения, при этом нарушая однородность кристаллизационной структуры укрепленного грунта. Поэтому при содержании менее 2 % портландцемента, добавка волокон фибры оказывает отрицательный эффект на прочностные показатели фиброцементогрунта.

При увеличении содержания более 2 % портландцемента, эффективность добавки фиброволокна возрастает с повышением количества минерального вяжущего, поскольку фибра, удерживаясь в цементогрунтовой матрице (рис. 8), воспринимает внешние нагрузки и таким образом увеличивает

структурные прочностные характеристики фиброцементогрунта.

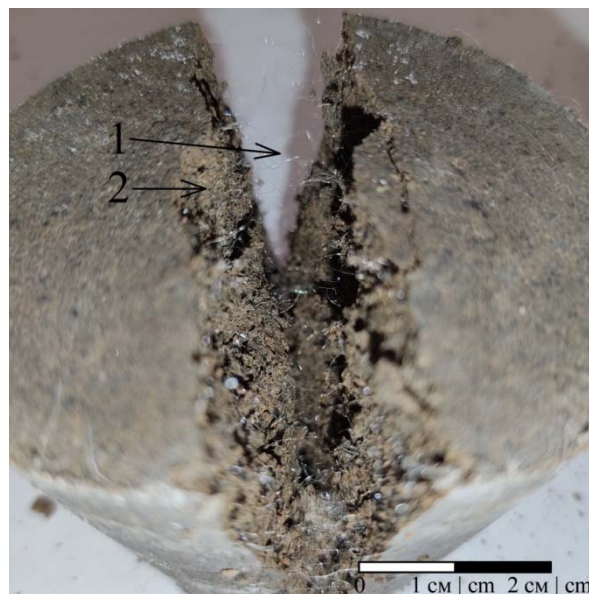


Рисунок 8. Макроструктура фиброцементогрунта с содержанием портландцемента 6 % и фиброволокна 1,5 % от массы сухого грунта:

1 – фиброволокно ; 2 – цементогрунтовая матрица

Figure 8. Macrostructure of fiber cement soil containing 6% Portland cement and 1.5% fiber by weight of dry soil: 1 – fiber; 2 – cement-soil matrix

Источник: собственная композиция автора  
Source: author's composition

Полученные закономерности соответствуют результатам, представленным в исследовании [12] эффективности дисперсного армирования фибры на основе полипропиленовых волокон по показателю прочности фиброцементогрунта на сдвиг. Прочность на сдвиг фиброцементогрунтов на основе полипропиленовой фибры увеличилась до 900% относительно цементогрунтов без добавки фибры. Кроме того, прочность фиброцементогрунтов с добавкой 0,2 % полипропиленового волокна и 1 % портландцемента соответствует цементогрунту с добавкой 5 % портландцемента.

Аналогично, в исследовании [17] установлено увеличение предела прочности на изгиб у фиброцементогрунтов на основе полипропиленовой фибры по сравнению с образцами без фибры. Оптимальный прирост прочности на изгиб 6450 кПа зафиксирован при содержании фиброволокна 0,75 %. В исследовании [11] показано увеличение предела

прочности при сжатии на 279 % и модуля упругости на 113,6 % у грунта, армированного волокнами полипропиленовой фибры.

Таким образом, дисперсное армирование волокнами фибры позволяет улучшить структурную прочность и физико-механические характеристики укрепленных грунтов. При этом, вид фиброволокна (базальтовое, полипропиленовое и т.д.), а также его характеристики: длина, форма, диаметр волокон, влияют на его оптимальное содержание в фиброцементогрунтовой смеси для улучшения процессов структурообразования и характеристик структурной прочности укрепленного грунта.

Повышенные показатели удельного сцепления и угла внутреннего трения фиброцементогрунта позволяют обеспечить дорожной одежде лесовозных автомобильных дорог высокий модуль упругости и трещиностойкость в условиях слабых и переувлажненных оснований [19, 24]. Это способствует увеличению срока службы лесовозных автомобильных дорог, эксплуатирующихся в сложных природных условиях и при высоких транспортных нагрузках.

Показатели удельного сцепления и угла внутреннего трения фиброцементогрунтов являются необходимыми для моделирования и расчета прочности конструкций дорожных одежд методом конечных элементов. Поэтому, основываясь на достигнутых результатах, целесообразны дальнейшие исследования прочностных и деформационных показателей конструкций дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта с учетом

нагрузок от лесотранспорта и сложных природных условий лесной зоны.

### Заключение

Проведенные исследования позволили получить фактические показатели и уравнения регрессии изменения удельного сцепления и угла внутреннего трения фиброцементогрунтов различного состава, которые необходимы для моделирования и расчета прочностных и деформационных показателей конструкций дорожных одежд.

Определены структурные прочностные характеристики и установлено, что добавка базальтового фиброволокна в составе фиброцементогрунта при оптимальной влажности влияет при уровне значимости  $p = 0,000026$  на угол внутреннего трения и при  $p = 0,000016$  на удельный коэффициент сцепления в зависимости от содержания портландцемента.

При содержании 2 % портландцемента, добавка 1,5% базальтового фиброволокна снижает удельный коэффициент сцепления на 8 % (10 кПа) и угол внутреннего трения на 1°, в силу недостаточного развития цементогрунтовой матрицы фиброцементогрунта. При содержании 6 % портландцемента, добавка 1,5 % базальтового фиброволокна увеличивает коэффициент сцепления на 43 % (258,7 кПа) и угол внутреннего трения на 2°, в связи с удержанием в цементогрунтовой матрице и восприятием внешних нагрузок за счет своего осевого растяжения.

### Список литературы

1. Восканянец, К. Е. Разработка составов и технологий укрепления и стабилизации грунтов для автодорожного строительства. Научные исследования. 2018; 6: 23-25. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35128618>.
2. Катаров, В. К. Ресурсосберегающая методика расчета дорожных одежд лесовозных дорог. Resources and technology. 2020; 1: 1-13. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42899012>.
3. Коновалова Н. А., Дабижа О. Н., Панков П. П., Руш Е. А. Утилизация гидролизного лигнина в составах цементогрунтов. Экология и промышленность России. 2019; 11: 32-37. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41321614>.
4. Мохирев, А. П. Факторы, влияющие на пропускную способность лесовозных дорог / А. П. Мохирев, С. О. Медведев, О. Н. Смолина // Лесотехнический журнал. – 2019. – Т. 9. – № 3 (35). – С. 103–113. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=40824797>.

5. Степанец В. Г., Герасимова С. А. Основания дорожных одежд из укрепленных грунтов повышенной прочности и морозостойчивости. Молодой ученый. 2020; 22 (312): 148-154. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42932994>.
6. Чернышова Е. В., Скрыпников А. В., Самцов В. В., Абасов М. А. Лесовозные дороги в транспортной сети лесопромышленного предприятия. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019; 2 (368): 95-101. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37320551>.
7. Чудинов, С. А. ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет». Фиброцементогрунтовая смесь. Патент 2785742 Российская Федерация, МПК E02D 3/12, E01C 3/04, E01C 7/36, C04B 28/04, C04B 111/20; Заявл. 05.03.2022; Опубл. 12.12.2022. – 9 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49994489>.
8. Чудинов, С. А. Совершенствование технологии укрепления грунтов в строительстве автомобильных дорог лесного комплекса : моногр. / С. А. Чудинов. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2022. – 164 с. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53667094>.
9. Чудинов, С. А. Укрепленные грунты в строительстве лесовозных автомобильных дорог : моногр. / С. А. Чудинов. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2020. – 174 с. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42927809>.
10. Чудинов С. А., Черняк Р. Д., Дмитриев В. Н., Байц О. Н. Опытнo-производственные исследования применения золошлаковых отходов в дорожном строительстве. Дороги и мосты. 2022. 2 (48): 254-273. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49855844>.
11. Ali M., Aziz M., Hamza M., Madni M. F. Engineering properties of expansive soil treated with polypropylene fibers. Geomech Eng. 2020. 22: 227–236. <https://doi.org/10.12989/gae.2020.22.3.227>.
12. Ayeledeen M., Azzam W., Arab M. G. The use of fiber to improve the characteristics of collapsible soil stabilized with cement. Geotech Geol Eng. 2022. 40: 1873–1885. <https://doi.org/10.1007/S10706-021-01997-4/FIGURES/12>.
13. Cho Y. K., Jung S. H., Choi Y. C. Effects of chemical composition of fly ash on compressive strength of fly ash cement mortar. Constr Build Mater. 2019. 204: 255–264. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.01.208>.
14. Chudinov S. The use of ash-mineral mixtures for the construction of high-strength coatings of forest roads. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. 574: 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/574/1/012010>.
15. Chudinov S. Improving the physical and mechanical properties of fortified soil for road construction in the forest zone. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 817: 012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/817/1/012007>.
16. De Jesús Arrieta Baldovino J., Dos Santos Izzo R., Rose J. L., Avanci M. A. Geopolymers based on recycled glass powder for soil stabilization. Geotechn Geolog Eng. 2020. 38(4): 4013–4031. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01274-w>.
17. Elkhebu A., Zainorabidin A., Asadi A. et al. Effect of incorporating multifilament polypropylene fibers into alkaline activated fly ash soil mixtures. Soils Found. 2019. 59: 2144-2154. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.11.015>.
18. Ghanizadeh A. R., Salehi M., Jalali F. Investigating the effect of lime stabilization of subgrade on the fatigue & rutting lives of flexible pavements using the nonlinear mechanistic-empirical analysis. Geotech Geol Eng. 2022. 41: 1287-1307. <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02336-x>.
19. Ghorbani A., Hasanzadehshooiili H. Prediction of UCS and CBR of microsilica-lime stabilized sulfate silty sand using ANN and EPR models; application to the deep soil mixing. Soils Found. 2018. 58: 34–49. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.11.002>.
20. Godoy V. B., Tomasi L. F., Benetti M. et al. Effects of curing temperature on sand-ash-lime mixtures with fibres and NaCl. Geotech Geol Eng. 2023. 3: 1–15. <https://doi.org/10.1007/S10706-023-02386-9/FIGURES/12>.

21. Gong Y., He Y., Han C. et al. Stability analysis of soil embankment slope reinforced with polypropylene fiber under freeze-thaw cycles. *Adv Mater Sci Eng*. 2019. 2019: 10. <https://doi.org/10.1155/2019/5725708>.
22. Liu J., Yang K., Gursaud N. Tensile strength of cement-treated champlain sea clay. *Geotech Geol Eng*. 2022. 40: 5467–5480. <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02226-2>.
23. Mazhar S., Guha Ray A. Stabilization of expansive clay by fibre-reinforced alkali-activated binder: an experimental investigation and prediction modelling. *Int J Geotech Eng*. 2021. 15: 977–993. <https://doi.org/10.1080/19386362.2020.1775358>.
24. Mousavi F., Abdi E. Unconfined compression strength of polymer stabilized forest soil clay. *Geotech Geol Eng*. 2022. 40: 4095–4107. <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02142-5>.
25. Muñoz Y. O., de Almeida J. L., Mora A. J. E. V. et al. The Behavior of Stabilized Reinforced Soil for Road Embankments Application. *Geotech Geol Eng*. 2023. 41: 2599–2628. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02416-6>.
26. Nezhad M. G., Tabarsa A., Latifi N. Effect of natural and synthetic fibers reinforcement on California bearing ratio and tensile strength of clay. *J Rock Mech Geotech Eng*. 2021. 13: 626–642. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.01.004>.
27. Ordoñez Muñoz Y., dos Santos L., Izzo R., Leindorf de Almeida J. et al. The role of rice husk ash, cement and polypropylene fibers on the mechanical behavior of a soil from Guabiro tuba formation. *Transp Geotech*. 2021. 31: 100673. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100673>.
28. Shen D., Liu X., Zeng X. et al. Effect of polypropylene plastic fibers length on cracking resistance of high performance concrete at early age. *Constr Build Mater*. 2020. 244: 117874. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117874>.
29. Tiwari N., Satyam N., Singh K. Effect of curing on micro-physical performance of polypropylene fiber reinforced and silica fume stabilized expansive soil under freezing thawing cycles. *Sci Rep*. 2020. 10: 6724. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64658-1>.
30. Vijayan D. S. Effect of Solid waste based stabilizing material for strengthening of Expansive soil. A review. *Environmental Technology & Innovation*. 2020. 20: 54-61. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101108>.
31. Wei H., Zhang Y., Cui J. et al. Engineering and environmental evaluation of silty clay modified by waste fly ash and oil shale ash as a road subgrade material. *Constr Build Mater* 2019. 196:204–213. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.060>.
32. Yadav J. S., Tiwari S. K., Shekhwat P. Strength behaviour of clayey soil mixed with pond ash, cement and randomly distributed fibres. *Transp Infrastruct Geotechnol* 2018. 5:191–209. <https://doi.org/10.1007/s40515-018-0056-z>.
33. Zainorabidin A., Agustina D. H. Effect of moisture content of cohesive subgrade soil. *Matec Web of Conferences*. 2018. 195: 1-7. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819503010>.
34. Zentar R., Wang H., Wang D. Comparative study of stabilization/solidification of dredged sediments with ordinary Portland cement and calcium sulfo-aluminate cement in the framework of valorization in road construction material. *Constr Build Mater*. 2021. 279: 122447. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122447>.

### References

1. Voskanyants K. E. Razrabotka sostavov i tekhnologij ukrepleniya i stabilizacii gruntov dlya avtodorozhnogo stroitel'stva [Development of compositions and technologies for strengthening and stabilizing soils for road construction]. *Nauchnye issledovaniya = Scientific research*. 2018; 6: 23-25. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35128618>.
2. Katarov V. K. Resursosberegayushchaya metodika rascheta dorozhnyh odezhd lesovoznyh dorog [Resource-saving methodology for calculating road pavements for logging roads] *Resources and technology*. 2020; 1: 1-13. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42899012>.



3. Konovalova N. A., Dabizha O. N., Pankov P. P., Rush E. A. Utilizaciya gidroliznogo lignina v sostavah cementogrunтов [Utilization of hydrolytic lignin in the composition of cement soils]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* = Ecology and Industry of Russia. 2019; 11: 32-37. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41321614>.
4. Mokhirev A. P., Medvedev S. O., Smolina O. N. Faktory, vliyayushchie na propusknyuyu sposobnost' lesovoznyh dorog [Factors influencing the capacity of logging roads]. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering journal. 2019; 3 (35): 103-113. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=40824797>.
5. Stepanets V. G., Gerasimova S. A. Osnovaniya dorozhnyh odezhd iz ukreplennyh grunтов povyshennoj prochnosti i morozoustojchivosti [Pavement bases from reinforced soils of increased strength and frost resistance]. *Molodoy uchenyj* = Young scientist. 2020. 22 (312): 148-154. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42932994>.
6. Chernyshova E. V., Skrypnikov A. V., Samtsov V. V., Abasov M. A. Lesovoznyye dorogi v transportnoj seti lesopromyshlennogo predpriyatiya [Timber roads in the transport network of a timber industry enterprise]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoy zhurnal* = Russian Forestry Journal. 2019; 2 (368): 148-154. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37320551>.
7. Chudinov S. A. Fibrocementogrunтовaya smes' [Fiber cement soil mixture]. Patent RF, no. RU 2 785 742 C1, 2022. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49994489>.
8. Chudinov S. A. Sovershenstvovanie tekhnologii ukrepleniya grunтов v stroitel'stve avtomobil'nyh dorog lesnogo kompleksa [Improving the technology of soil stabilization in the construction of roads of the forestry complex]: Monografiya = Monograph. Ekaterinburg, USFEU Publ. 2022: 164 p. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53667094>.
9. Chudinov S. A. Ukreplennyye grunты v stroitel'stve lesovoznyh avtomobil'nyh dorog [Reinforced soils in the construction of logging roads]: Monografiya = Monograph. Ekaterinburg, USFEU Publ. 2020: 174 p. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42927809>.
10. Chudinov S. A., Chernyak R. D., Dmitriev V. N., Bajz O. N. Opytno-proizvodstvennyye issledovaniya primeneniya zoloshlakovyh othodov v dorozhnom stroitel'stve [Pilot research on the use of ash and slag waste in road construction]. *Dorogi i mosty* = Roads and bridges. 2022. 2 (48): 254-273. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49855844>
11. Ali M., Aziz M., Hamza M., Madni M. F. Engineering properties of expansive soil treated with polypropylene fibers. *Geomech Eng.* 2020. 22: 227–236. <https://doi.org/10.12989/gae.2020.22.3.227>.
12. Ayeldeen M., Azzam W., Arab M. G. The use of fiber to improve the characteristics of collapsible soil stabilized with cement. *Geotech Geol Eng.* 2022. 40: 1873–1885. <https://doi.org/10.1007/S10706-021-01997-4/FIGURES/12>.
13. Cho Y. K., Jung S. H., Choi Y. C. Effects of chemical composition of fly ash on compressive strength of fly ash cement mortar. *Constr Build Mater.* 2019. 204: 255–264. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.01.208>.
14. Chudinov S. The use of ash-mineral mixtures for the construction of high-strength coatings of forest roads. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2020. 574: 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/574/1/012010>.
15. Chudinov S. Improving the physical and mechanical properties of fortified soil for road construction in the forest zone. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2020. 817: 012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/817/1/012007>.
16. De Jesús Arrieta Baldovino J., Dos Santos Izzo R., Rose J. L., Avanci M. A. Geopolymers based on recycled glass powder for soil stabilization. *Geotechn Geolog Eng.* 2020. 38(4): 4013–4031. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01274-w>.
17. Elkhebu A., Zainorabidin A., Asadi A. et al. Effect of incorporating multifilament polypropylene fibers into alkaline activated fly ash soil mixtures. *Soils Found.* 2019. 59: 2144-2154. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.11.015>.

18. Ghanizadeh A. R., Salehi M., Jalali F. Investigating the effect of lime stabilization of subgrade on the fatigue & rutting lives of flexible pavements using the nonlinear mechanistic-empirical analysis. *Geotech Geol Eng.* 2022. 41: 1287-1307. <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02336-x>.
19. Ghorbani A., Hasanzadehshooili H. Prediction of UCS and CBR of microsilica-lime stabilized sulfate silty sand using ANN and EPR models; application to the deep soil mixing. *Soils Found.* 2018. 58: 34–49. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.11.002>.
20. Godoy V. B., Tomasi L. F., Benetti M. et al. Effects of curing temperature on sand-ash-lime mixtures with fibres and NaCl. *Geotech Geol Eng.* 2023. 3: 1–15. <https://doi.org/10.1007/S10706-023-02386-9/FIGURES/12>.
21. Gong Y., He Y., Han C. et al. Stability analysis of soil embankment slope reinforced with polypropylene fiber under freeze-thaw cycles. *Adv Mater Sci Eng.* 2019. 2019: 10. <https://doi.org/10.1155/2019/5725708>.
22. Liu J., Yang K., Gurbarsud N. Tensile strength of cement-treated champlain sea clay. *Geotech Geol Eng.* 2022. 40: 5467–5480. <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02226-2>.
23. Mazhar S., Guha Ray A.. Stabilization of expansive clay by fibre-reinforced alkali-activated binder: an experimental investigation and prediction modelling. *Int J Geotech Eng.* 2021. 15: 977–993. <https://doi.org/10.1080/19386362.2020.1775358>.
24. Mousavi F., Abdi E. Unconfined compression strength of polymer stabilized forest soil clay. *Geotech Geol Eng.* 2022. 40: 4095–4107. <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02142-5>.
25. Muñoz Y. O., de Almeida J. L., Mora A. J. E. V. et al. The Behavior of Stabilized Reinforced Soil for Road Embankments Application. *Geotech Geol Eng.* 2023. 41: 2599–2628. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02416-6>.
26. Nezhad M. G., Tabarsa A., Latifi N. Effect of natural and synthetic fibers reinforcement on California bearing ratio and tensile strength of clay. *J Rock Mech Geotech Eng.* 2021. 13: 626–642. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.01.004>.
27. Ordoñez Muñoz Y., dos Santos L., Izzo R., Leindorf de Almeida J. et al. The role of rice husk ash, cement and polypropylene fibers on the mechanical behavior of a soil from Guabirota formation. *Transp Geotech.* 2021. 31: 100673. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100673>.
28. Shen D., Liu X., Zeng X. et al. Effect of polypropylene plastic fibers length on cracking resistance of high performance concrete at early age. *Constr Build Mater.* 2020. 244: 117874. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117874>.
29. Tiwari N., Satyam N., Singh K. Effect of curing on micro-physical performance of polypropylene fiber reinforced and silica fume stabilized expansive soil under freezing thawing cycles. *Sci Rep.* 2020. 10: 6724 <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64658-1>.
30. Vijayan D. S. Effect of Solid waste based stabilizing material for strengthening of Expansive soil. A review. *Environmental Technology & Innovation.* 2020. 20: 54-61. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101108>.
31. Wei H., Zhang Y., Cui J. et al. Engineering and environmental evaluation of silty clay modified by waste fly ash and oil shale ash as a road subgrade material. *Constr Build Mater* 2019. 196:204–213. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.060>.
32. Yadav J. S., Tiwari S. K., Shekhwat P. Strength behaviour of clayey soil mixed with pond ash, cement and randomly distributed fibres. *Transp Infrastruct Geotechnol* 2018. 5:191–209. <https://doi.org/10.1007/s40515-018-0056-z>.
33. Zainorabidin A., Agustina D. H. Effect of moisture content of cohesive subgrade soil. *Matec Web of Conferences.* 2018. 195: 1-7. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819503010>.
34. Zentar R., Wang H, Wang D. Comparative study of stabilization/solidification of dredged sediments with ordinary Portland cement and calcium sulfo-aluminate cement in the framework of valorization in road construction material. *Constr Build Mater.* 2021. 279: 122447. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122447>.



### Сведения об авторе

✉ *Чудинов Сергей Александрович* – кандидат техн. наук, зав. кафедрой автомобильных дорог, мостов и тоннелей, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», ул. Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620100, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4492-8188>, e-mail: [chudinovsa@m.usfeu.ru](mailto:chudinovsa@m.usfeu.ru).

### Information about the author

✉ *Sergey A. Chudinov* – PhD (Engineering), Head Department of Highways, Bridges and Tunnels, Ural State Forestry University, Siberian Tract str., 37, Ekaterinburg, Russian Federation, 620100, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4492-8188>, e-mail: [chudinovsa@m.usfeu.ru](mailto:chudinovsa@m.usfeu.ru).

✉ – Для контактов/Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/8>

УДК 674.81



## Методика для оценки степени биоразлагаемости пластиков на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья без добавления связующих веществ

Артём В. Артёмов✉, [artemovav@m.usfeu.ru](mailto:artemovav@m.usfeu.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6994-0154>

Анна С. Ершова, [ershovaas@m.usfeu.ru](mailto:ershovaas@m.usfeu.ru) <https://orcid.org/0000-0001-6248-0028>

Алексей Е. Шкуро, [shkuroae@m.usfeu.ru](mailto:shkuroae@m.usfeu.ru) <https://orcid.org/0000-0002-0469-2601>

Виктор Г. Бурындин, [buryndinv@gmail.com](mailto:buryndinv@gmail.com) <https://orcid.org/0000-0001-6900-3435>

ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, 620100, Российская Федерация

В настоящее время разработаны и применяются технологии по трансформации биомассы лигноцеллюлозосодержащего сырья без добавления синтетических связующих в композиционные материалы различной номенклатуры применений. Для таких материалов получил определенное распространение собирательный термин «Пластик», или, сокращенно, ПБС. Существующие методы испытаний для определения степени биоразлагаемости не применимы для ПБС. Оценка биоразлагаемости ПБС позволила выявить ряд морфологических признаков и эксплуатационных показателей (далее критериев), при помощи которых возможно выполнять экспресс-оценку и определять степень биоразлагаемости ПБС на основе различного пресс-сырья. Была разработана балльно-рейтинговая система оценки степени биоразлагаемости ПБС на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья по выявленным пяти основным критериям при выдержке 85 суток в почво-грунте. Предложенная балльная система была апробирована на образцах ПБС на основе различного пресс-сырья: опилки сосны, березы и лиственницы, растительные остатки борщевика и конопли технической, шелуха пшеницы и листовой опад. Полученные результаты испытаний ПБС были обработаны согласно предложенной методике оценки и был определен возможный потенциал биодegradации исследуемых материалов. В общем аспекте материалы на основе ПБС можно характеризовать как материалы с высоким потенциалом к биодеструкции. Наиболее потенциальным к биоразложению можно рассматривать ПБС на основе сосны и листового опада, которые максимально деструктируют в почво-грунте за 85 суток. Установленные индивидуальные степени биоразлагаемости ПБС на основе различного лигноцеллюлозосодержащего сырья были интерпретированы в рамках ранее полученных результатов по исследованию свойств самого исходного сырья. Таким образом, был сделан вывод о том, что степень биоразлагаемости ПБС обуславливается свойствами самого исходного растительного сырья в условиях идентичной пьезотермической обработки при получении материала.

**Ключевые слова:** пластик, древесные отходы, растительные отходы, биоразлагаемость, методика, признаки, экспресс-оценка, балльная система

**Финансирование:** данное исследование не получало внешнего финансирования

**Благодарности:** авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи


**Конфликт интересов:** авторы заявили об отсутствии конфликта интересов

**Для цитирования:** Методика для оценки степени биоразлагаемости пластиков на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья без добавления связующих веществ / А. В. Артёмов, А. С. Ершова, А. Е. Шкуро, В. Г. Бурындин // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 1 (53). – С. 134–150. – Библиогр.: с. 146–149 (28 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/8>.

Поступила 17.11.2023. Пересмотрена 22.01.2024. Принята 12.02.2024. Опубликована онлайн 20.03.2024.

Article

**Methodology for assessing the degree of biodegradability of plastics based on lignocellulose-containing raw materials without resins**

Artyom V. Artyomov✉, artemovav@m.usfeu.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-6994-0154>

Anna S. Ershova, ershovaas@m.usfeu.ru  <https://orcid.org/0000-0001-6248-0028>

Aleksey E. Shkuro, shkuroae@m.usfeu.ru  <https://orcid.org/0000-0002-0469-2601>

Victor G. Buryndin, buryndinv@g@m.usfeu.ru  <https://orcid.org/0000-0001-6900-3435>

*Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt str., 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation*

**Abstract**

Currently, technologies have been developed and implemented to transform the biomass from lignocellulosic-containing raw materials (including wood), without the addition of synthetic binders, into composite materials with various applications. For these materials, the common term resinless "plastic", or abbreviated PWR, has become somewhat popular. The current test methods for determining the extent of biodegradation are not suitable for PWR. This facilitates determining the degree of biodegradability of PWR based on various pressing materials. A scoring-rating system was developed to assess the degree of biodegradability of PWR based on lignocellulosic raw materials, using the identified 5 main criteria when aged 85 days in the soil. The proposed scoring system was tested on samples of PWR derived from various pressing materials, including pine, birch, and larch sawdust, vegetative residues of knotweed and industrial hemp, wheat bran, and deciduous litter. The test results of PWR were processed using the proposed evaluation methodology, helping determine the potential for biodegradation of the investigated materials. In general, PWR-based materials can be characterized as materials with a high potential for biodegradation. The most potential for biodegradation can be considered PWR based on pine and leaf litter, which degrade as much as possible in the soil in 85 days. The established individual degrees of biodegradability of PWR based on various lignocellulosic raw materials were interpreted in the context of previously obtained results regarding the properties of the original raw materials. Thus, a conclusion was drawn that the degree of biodegradability of PWR is influenced by the properties of the original plant raw material under identical piezothermal treatment conditions during material production.

**Keywords:** *plastic, wood waste, plant waste, biodegradability, methodology, signs, express assessment, point system*

**Funding:** this research received no external funding

**Acknowledgments:** the authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest

**For citation:** Artyomov A. V., Ershova A. S., Shkuro A. E., Buryndin V. G. (2024). Methodology for assessing the degree of biodegradability of plastics based on lignocellulose-containing raw materials without resins. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No.1 (53), pp. 134-150 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/8>.

*Received* 17.11.2023. *Revised* 22.01.2024. *Accepted* 12.02.2024. *Published online* 20.03.2024.

### Введение

В настоящее время в РФ экологическая безопасность страны объявлена частью национальной безопасности, стратегией которой является максимальное вовлечение отходов производства и потребления в хозяйственный оборот в качестве вторичных ресурсов с целью получения отечественной и импортозамещенной продукции [1-3]. Такой подход в решении проблемы по минимизации отходов является актуальным во всем мире и экологически ориентированным [4-6]. Как и любая продукция, продукция на основе вторичных ресурсов должна соответствовать основному природоохранному критерию: в конце жизненного цикла оказывать минимальное воздействие на окружающую среду. Данному требованию в полном объеме могут соответствовать материалы на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья в виде отходов (биомассы) лиственной и хвойной древесины и однолетних растений [7-9].

В настоящее время разработаны и применяются технологии по трансформации биомассы лигноцеллюлозосодержащего сырья без добавления синтетических связующих в композиционные материалы различной номенклатуры применений [10, 11]. Для таких материалов получил определенное распространение собирательный термин «Пластик», или, сокращенно, ПБС». Несмотря на различные подходы в получении ПБС, неизменными условиям остаются – это пьезотермическая обработка лигноцеллюлозо-содержащего сырья в герметизированном пространстве. При таких условиях происходит трансформация лигнин-углеводного комплекса за счет реакций поликонденсации и полимеризации, с помощью которых происходит образование сшитого и монолитного материала [12, 13].

Однако, материалы на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья без специальной обработки подвержены биологической деструкции [14, 15]. Данный недостаток можно рассматривать и как достоинство – потенциал к биоразложению материалов. Естественная деструкция ПБС с сочетанием требуемых эксплуатационных свойств позволяет использовать экологически ориентированный подход по внедрению данных материалов.

В настоящее время имеются разнообразные методы испытаний материалов на биостойкость (грибостойкость) и биоразрушение. Большая часть методов – это определение воздействия различных микроорганизмов и грибов на устойчивость материалов к их воздействию. В большинстве случаев, критерием выступает визуальная оценка. Кроме того, рядом методов используется оценка по изменению физико-механических свойств (например, изменение массы, прочностных показателей и т.д.) [16].

Отмечается [17], что наиболее распространенный способ оценки биодegradации по степени изменения массы образцов в процессе испытаний, является неуниверсальным.

Авторы работы [18] делают вывод о том, что более 40 % общего объема биоповреждений материалов и конструкций связано с деятельностью микроорганизмов. При этом отмечают, что большое разнообразие методов исследований биодegradации связано с широким кругом биологических организмов, являющихся агентами биоразрушений самих объектов биоповреждений.

Для древесно-полимерных композитов (ДПК) в работе [19] была выполнена (совместная с ПБС на основе древесной муки и шелухи пшеницы) оценка биоразложения по результатам 21 суток выдержки в активном грунте. Активный грунт соответствовал ГОСТ 9.060-75 «Единая система защиты от коррозии и старения. Ткани. Метод лабораторных испытаний на устойчивость к микробиологическому разрушению». Авторами было выделено 15 критериев лабораторной и визуальной оценки морфологических изменений структуры образцов. После завершения исследований по результатам полученных данных был выбран диапазон баллов для экспресс-оценки потенциала биоразложения полимерных материалов и композитов на основе древесного и растительного сырья.

Кроме того, авторы отмечают, что материалы ПБС на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья сильно подвержены биологическому разрушению в активном грунте в течение 3 недель. По истечению данного срока, большинство образцов ПБС были не пригодны для испытаний на биоразлагаемость, в частности невозможно было определить морфологические характеристики [19].

Одним из лабораторных методов оценки биоразлагаемости полимерных материалов является имитация естественных почвенных условий. Исследуемые образцы помещают в почву определенного биохимического состава, с постоянными показателями температуры и влажности в течение опыта. Скорость биодеструкции оценивают по динамике изменения во времени свойств образцов, состава почвы, содержание микрофлоры и проч. [20].

Таким образом, учитывая высокую естественную деструкцию лигноцеллюлозосодержащих материалов в условиях активного грунта, испытания ПБС на биоразложение целесообразно проводить при выдержке в почво-грунте. Согласно ГОСТ Р 54530-2011 "Ресурсосбережение. Упаковка. Требования, критерии и схема утилизации упаковки посредством компостирования и биологического разложения" процесс компостирования биоразлагаемой упаковки должен продолжаться не более 85 сут.

При этом требуется единый подход по оценке показателя биоразлагаемости материалов на основе ПБС, который должен обладать универсальностью и оперативностью в условиях естественной деструкции при повышенной биологической активности испытываемой среды.

На основании выполненного анализа научных и экспериментальных данных, были выявлены основополагающие признаки (критерии) морфологического изменения образцов ПБС на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья при испытаниях на биоразлагаемость:

1. Деструкция материала.
2. Расслоение (разбухание) материала по толщине.
3. Деформация материала.
4. Пигментация лицевой поверхности материала.
5. Микробиологическое поражение материала

Данные критерии обладают оперативностью и доступностью, требуют минимальных затрат времени и наличие простейшего лабораторного оборудования (весы, толщиномер, микроскоп, штангенциркуль).

Цель данной работы – обоснование принятых основных критериев оценки биоразлагаемости ПБС

на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья по отношению к почво-грунту сроком не более 85 сут выдержки в нем.

Кроме того, требуется апробация предложенной системы балльной оценки степени биоразложения ПБС на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья по основным принятым критериям.

### Материалы и методы

В качестве исходного пресс-материала для получения ПБС были рассмотрены следующее лигноцеллюлозосодержащее сырьё:

- опилки сосны, лиственницы, березы от деревообработки хвойных и лиственных пород древесины;
- плодовые оболочки культурных сельскохозяйственных растений (шелуха пшеницы);
- недеревесные растительные остатки – биомасса борщевика, костра конопли технической, листовой опад березы.

Исследуемое лигноцеллюлозосодержащее сырьё размельчалось и фракционировалось.

Для выполнения исследований из лигноцеллюлозосодержащего сырья был изготовлен ПБС методом горячего компрессионного прессования в виде образцов-дисков диаметром 90 мм и толщиной 3 мм в закрытых пресс-формах. Режимы изготовления образцов: давление прессования – 40 МПа, температура прессования 180 °С (для древесного пресс-сырья) и 160 °С (для остального растительного пресс-сырья), продолжительность прессования – 10 мин, продолжительность охлаждения под давлением – 10 мин, продолжительность кондиционирования в комнатных условиях – 24 ч. Влажность пресс-материала – 12 %. Фракционный состав пресс-сырья – 0,7 мм.

После кондиционирования проводилось определение физико-механических свойств образцов (согласно ГОСТ 4648-2014, ГОСТ 4670-91).

Испытание на биоразложение осуществлялось путем экспозиции образцов ПБС в виде квадратов 20 x 20 мм в почво-грунте (в качестве почво-грунта был принят грунт для рассады с добавлением компоста по ТУ 0392-001-59264059-03). Исследуемые ПБС помещались в контейнер с грунтом на глубину от 5 см в горизонтальном положении. После

внесения образцов в почво-грунт, для оценки биологической активности почвенной среды производилось его засеивание семенами трав. Для засева использовалась травосмесь, используемая для биологического этапа рекультивации нарушенных земель.

Время выдержки образцов в почво-грунте при комнатной температуре ( $20 \pm 2$  °С) и влажности грунта  $60 \pm 5$  % составляло 85 сут.

Общая экспресс-оценка биоразлагаемости изучаемых материалов выполнялась с помощью балльной системы. Количество баллов – 5. Минимальный балл – 1, максимальный – 5 (при большом массиве однородных материалов возможно выставления дробного балла в зависимости от рейтинга).

В случае невозможности произведения оценки, например, образец был не пригоден для испытаний или разрушился в ходе испытаний – количество баллов принимался равным 5.

Формула расчета общего балла с целью оценки степени биоразложения и биоразлагаемости материала будет соответствовать среднеарифметическому значению суммы всех баллов критериев (1):

$$B = \frac{D+P+Dф+П+М}{5}, \quad (1)$$

где D – количество баллов, принятых по критерию деструкции материала;

P – количество баллов, принятых по критерию расслоения (разбухания) материала по толщине;

Dф – количество баллов, принятых по критерию деформации материала;

П – количество баллов, принятых по критерию пигментации лицевой поверхности материала;

М – количество баллов, принятых по критерию микробиологического поражения материала.

D – is the number of points taken according to the criterion of destruction of the material;

P – is the number of points taken according to the criterion of stratification (swelling) of the material in thickness;

Df – the number of points taken according to the criterion of deformation of the material;

P – the number of points taken according to the criterion of pigmentation of the front surface of the material;

M – is the number of points taken according to the criterion of microbiological damage of the material.

Диапазон баллов для экспресс-оценки потенциала биоразложения ПБС на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья представлен в табл. 1.

Таблица 2

Оценка степени биоразложения

Table 2

Assessment of the biodegradability of the material

Общий балл   Total point	Степень биоразложения   Degree of biodegradation	Оценка биоразлагаемости материала   Assessment of the biodegradability of the material
1	МИНИМАЛЬНАЯ   MINIMUM	Материал практически не подвержен биологической деструкции (ограниченный)   The material is almost not subject to biological destruction (limited)
2	НИЗКАЯ   LOW	Малоспособный материал к биодеструкции   Low-capacity material for biodegradation
3	УМЕРЕННАЯ   MODERATE	Умеренный и/или частичный биоразлагаемый материал   Moderate and/or partial biodegradable material
4	ВЫСОКАЯ   HIGH	Материал с высоким потенциалом биодеструкции   Material with high biodegradation potential
5	МАКСИМАЛЬНАЯ   MAXIMUM	Полностью биоразлагаемый материал   Fully biodegradable material

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Оценка степени биоразложения по принятым морфологическим признакам осуществлялась независимыми наблюдателями ( $n = 5$ ).

Полученные результаты балльно-рейтинговой оценки по каждому рассматриваемому материалу от каждого наблюдателя были подвергнуты статистической обработке на выявление грубых промахов и определения интервала доверительной вероятности.

Для выявления маркерных морфологических признаков, обуславливающих приоритетную направленность процесса биоразложения исследуемых пластиков, в работе применялась радиальная графическая гистограмма. Используемая визуализация позволяла отобразить изменение используемых

показателей на двухмерной диаграмме, где каждому принятому морфологическому признаку соответствовал отдельный луч [21].

Для оценки влияния принятых показателей (критериев) биоразложения друг на друга, выполнялся корреляционный анализ результатов эксперимента и выходных факторов эксперимента [21].

### Результаты

Результаты определения физико-механических свойств ПБС на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья после проверки на грубые промахи измерений (по Q-критерию [21]) представлены в табл. 2.

Таблица 2

Физико-механические свойства ПБС на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья

Table 2

Physico-mechanical properties of PWR based on lignocellulose-containing raw materials

Физико-механические свойства   Physical and mechanical properties	Исходное сырьё   Raw materials						
	Опилки сосны   Sawdust pine	Опилки березы   Sawdust birch	Опилки лиственницы   Sawdust larch	Листовой опад   Leaf litter	Биомасса борщевика   Biomass of hogweed	Костра конопля   Hemp stalk	Шелуха пшеницы   Wheat husk
	Обозначение пластика   Plastic designation						
	ДПс   WPp	ДПб   WPb	ДПл   WPl	РПл   PPl	РПб   PPh	РПк   PPhs	РПп   PPwh
Плотность, кг/м <sup>3</sup>   Density, kg/m <sup>3</sup>	1038	1035	1123	1089	1025	1001	1059
Модуль упругости при изгибе (по прогибу образца-диска), МПа   Modulus of elasticity at bending (by deflection of the sample disk), МПа	1211	885	1484	1155	1226	1110	1182
Прочность при изгибе, МПа   Bending strength, МПа	11,9	5,0	8,9	5,2	9,8	7,8	11,3
Твердость по Бринеллю, МПа   Brinell hardness, МПа	38,3	19,0	17,6	4,4	28,9	14,6	33,9

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

По данным табл. 2 был сделан вывод о том, что исследуемый материал на основе ПБС обладал требуемыми и необходимыми физико-механическими свойствами. Результаты испытаний на фи-

зико-механические свойства данных материалов являлись подтверждением образования материала на основе ПБС (именно пластиков, а не спрессованных

брикетов), тем самым давали основание для выполнения оценки на биоразлагаемость с получением достоверных результатов.

Шкалы оценки с целью применения предлагаемых критериев для определения степени биоразложения ПБС принимались следующие:

1. Деструкция материала (разрушение, потеря массы): оценивается визуальное разрушение образцов и/или оценка по потере массы (рис. 1).

Максимальное значение баллов: разрушение и/или максимальная потеря массы, минимальный балл – отсутствие разрушения и/или минимальная убыль массы. Баллы определяются в соответствии со степенью разрушения (потери массы): от 70 до 100 % – 5 баллов, от 50 до 69 % – 4 балла, от 30 до 49 % – 3 балла, от 10 до 29 % – 2 балла, от 1 до 9 % – 1 балл.



Рисунок 2. Деструктивные изменения с потерей массой образцов на примере РПл: а) исходное состояние, б) после испытания на биоразложение (4,9 баллов)

Figure 2. Destructive changes with loss of mass of samples on the example of PPI: initial state, b) after the biodegradation test (4.9 points)

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

2. Расслоение / разбухание материала по толщине (появление трещин, полостей / увеличение ли-

нейных размеров): оценивается наличие расслоений, появлений трещин и полостей образцов по толщине / изменение толщины образцов (рис. 2).

Максимальное значение баллов при наибольшем количестве расслоений / максимальных значениях толщины, минимальный балл – минимальное количество расслоений / минимальное значение разбухания. Баллы проставляются в соответствии со степенью разбухания: от 0 до 9 % – 1 балл, от 10 до 29 % – 2 балла, от 30 до 49 % – 3 балла, 50 до 69 % – 4 балла, от 70 % и более – 5 баллов.

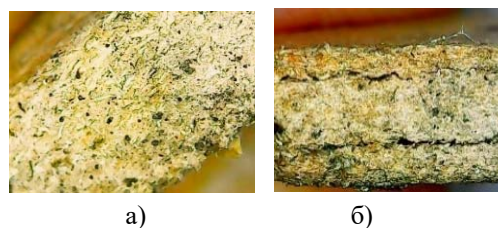


Рисунок 2. Изменения по толщине с расслоением образцов на примере ДПл (фрагмент): а) исходное состояние, б) после испытания на биоразложение (2,9 баллов)

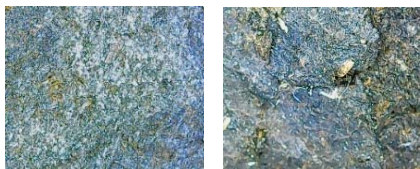
Figure 2. Changes in thickness with stratification of samples using the example of a WPI (fragment): a) initial state, b) after the biodegradation test (2.9 points)

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

3. Деформация материала (изменение формы, коробление, искривление): оценивается наличие изменений и появлений дефектов лицевой поверхности образцов, а также формоизменений внешнего вида (рис. 3).

Максимальное значение баллов при наибольшем количестве дефектов, минимальный балл – минимальное количество дефектов. Баллы проставляются в соответствии со степенью и площадью повреждения образцов: от 70 до 100 % – 5 баллов, от 50 до 69 % – 4 балла, от 30 до 49 % – 3 балла, от 10 до 29 % – 2 балла, от 0 до 9 % – 1 балл.





а) б)

Рисунок 3. Деформационные изменения лицевой поверхности образцов на примере ДПб (фрагмент):

а) исходное состояние, б) после испытания на биоразложение (4,9 баллов)

Figure 3. Deformation changes of the front surface of the samples on the example of WPb (fragment):

а) initial state, б) after the biodegradation test (4.9 points)

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

4. Пигментация лицевой поверхности материала (изменение цвета и оттенка, появление темных пятен): визуально оценивается площадь цветовых изменений и окраски образцов, формирование пятен (рис. 4).

Максимальное значение баллов при максимальной пигментированности, минимальный балл – минимальное пигментированности. Баллы проставляются в соответствии с площадью цветового изменения лицевой поверхности образцов: от 70 до 100 % – 5 балл, от 50 до 69 % – 4 балла, от 30 до 49 % – 3 балла, от 10 до 29 % – 2 балла, от 0 до 9 % – 1 балл.



а) б)

Рисунок 4. Цветовые изменения лицевой поверхности образцов на примере РПп (фрагмент):

а) исходное состояние, б) после испытания на биоразложение (4,2 балла)

Figure 4. Color changes of the front surface of the samples: а) initial state, б) after the biodegradation test

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

5. Микробиологическое поражение материала (наличие грибка, плесени): визуально оценивается площадь и глубина биологического поражения в виде грибка, плесени и ослизнение (рис. 5).

Максимальное значение баллов при максимальном поражении, минимальный балл – минимальном поражении. Баллы проставляются в соответствии с площадью и глубиной биологического повреждения образцов: от 70 до 100 % – 5 балл, от 50 до 69 % – 4 балла, от 30 до 49 % – 3 балла, от 10 до 29 % – 2 балла, от 0 до 9 % – 1 балл.



а) б)

Рисунок 5. Микробиологическое повреждение поверхности образцов на примере ДПс (фрагмент):

а) исходное состояние, б) после испытания на биоразложение (5 баллов)

Figure 5. Microbiological damage to the surface of the samples using the example of WPs (fragment):

а) initial state, б) after the biodegradation test (5 points)

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

Расчет баллов критериев степени биоразложения с целью оценки биоразлагаемости ПБС на основе различного лигноцеллюлозосодержащего сырья выполнялся согласно формуле (1).

### Обсуждение

Результаты апробации системы балльной оценки степени биоразложения ПБС на различном растительном сырье, а также результаты статической обработки полученных данных представлены в табл. 3.

Максимальное значение коэффициента вариации не превышает более 5 %, что говорит об однородности принятых совокупности морфологических признаков с целью оценки биоразлагаемости ПБС.

Визуализированные маркерные морфологические признаки (критерии) оценки биоразлагаемости ПБС на основе различного сырья представлены на рис. 6 и 7.

С целью выявления закономерностей, связанных с изначальной структурой исходного пресс-материала, были рассмотрены по отдельности ПБС на основе древесного и ПБС на основе растительного недревесного сырья.

Таблица 3

Результаты оценки по балльной системе принятых критериев степени биоразложения ПБС

Table 3

The results of assessing the degree of biodegradation of WPC based on the adopted scoring criteria.

Образец пластика   Plastic sample	Средний балл по критерию оценки   Average score according to the assessment criterion					Коэффициент вариации, %   Variation coefficient, %				
	Д   D	Р   S	Дф   Df	П   P	М   M	Д   D	Р   S	Дф   Df	П   P	М   M
	Наблюдения (n=5)   Observations (n=5)					Выборка (n=5)   Samples (n=5)				
ДПс   WPr	4,9	4,1	4,2	5,0	5,0	0,8	1,3	1,2	0,5	0,4
ДПб   WPb	1,8	2,0	4,9	1,0	1,1	4,3	1,9	1,0	2,4	4,1
ДПл   WPl	1,0	2,9	3,2	4,2	3,8	3,8	2,9	1,6	0,9	2,4
РПл   RPPl	4,9	5,0	5,0	4,8	3,1	0,5	0,5	0,0	0,8	1,3
РПб   RPPh	1,8	4,9	3,9	1,9	2,3	2,1	1,0	1,9	1,3	3,3
РПк   RPPhs	1,9	4,9	2,2	2,1	3,9	3,6	2,0	3,1	2,6	4,9
РПп   RPWh	4,0	3,1	3,0	4,2	4,9	1,2	3,1	0,0	0,6	1,2

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations



Рисунок 6. Маркерные морфологические признаки биоразлагаемости ПБС на основе древесного сырья

Figure 6. Marker morphological signs of biodegradability of PWR based on wood raw materials

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Анализ рис. 6 говорит, что для ПБС на основе сосновых опилок проявляются все характерные признаки биологической деструкции. Т.е. выделение какого-то характерного маркерного критерия для ПБС на данном типе сырья весьма затруднителен, так деструкция проходит по всем направлениям принятых показателей.

Для ПБС на основе опилок лиственницы в процессе биологического воздействия характерно проявляется пигментация, которая вызывается вероятнее всего гнилостными процессами, протекающие на поверхности материала. Лиственница обладает

стойкостью к гниению, благодаря смоле и камеди пропитывающей дерево [22]. Таким образом, процесс микробиологического повреждения протекает только на поверхности самого материала, вызывая в первую очередь изменения его цветовой окраски. Еще одним характерным признаком является – деформация, которая типична для самой древесины лиственницы [23].

Образцы ПБС на основе опилок березы в рамках выполненных исследований показали самые наименьшие значения принятых критериев. Это позволяет говорить о том, что данные материалы проявляют антибактериальную и антигрибковую активность из-за содержания в пресс-сырье коры березы [24]. Маркерным показателем, по которому можно судит о протекающих процессах биодеструкции, для данных пластиков является его деформация. Деформирование образцов связано с высокой способностью водопоглощения. Именно избыточная влага почвенного субстрата вызывала процессы механической деформации исследуемого материала [25].

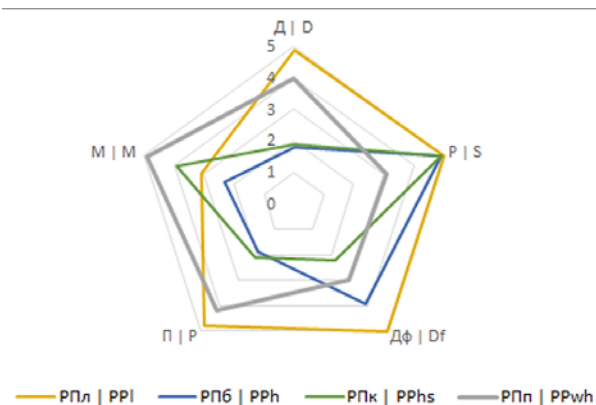


Рисунок 7. Маркерные морфологические признаки биоразлагаемости ПБС на основе недревесного растительного сырья

Figure 7. Marker morphological features of the biodegradability of non-wood plant-based WPC

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Согласно представленным данным на рис. 7, для ПБС на биомассы листового опада по аналогии с ПБС на основе опилок сосны проявляются все характерные признаки биологической деструкции. Т.е. выделение какого-то характерного маркерного критерия для ПБС на данном типе сырья весьма затруднителен, так деструкция проходит по всем направлениям принятых показателей.

Образцы ПБС на основе биомассы борщевика и конопли технической проявляют одинаковый уровень биологической деструкции, но достигаются различным подходом. Так, для данных материалов характерно первоначальное максимальное разбухание, которое инициирует для ПБС на основе биомассы борщевика дальнейшую деструкцию и проявляется в виде деформации. Для ПБС на основе ко-

стры конопли, первоначальное разбухание сопровождается дальнейшим микробиологическим повреждением, проявляющимся в виде омыления и ослизнения. Такое поведение данных образцов ПБС объясняется токсичностью борщевика для микроорганизмов из-за большого содержания в своём составе фуранокумаринов [26]. В свою очередь, для культуры конопли технической характерно высокое содержание эфирного конопляного масла [27], которое подвержено окислению до низкомолекулярных соединений, в т.ч. и до свободных жирных кислот [28], и, возможно, по этой причине сопровождается процессами омыления.

Для пластиков на основе шелухи пшеницы проявляются основные признаки, подтверждающие активность процесса деструкции, которые сопровождаются интенсивным изменением окраски и наличием признаков микробиологического поражения – области распространения плесневых грибов [19].

Общий анализ маркерных морфологических признаков биоразлагаемости ПБС на основе различного растительного сырья (древесного и недревесного) показывают, что сам процесс деструкции данных материалов зависит в первую очередь от исходных свойств лигноцеллюлозосодержащего пресс-сырья, которое и будет обуславливать этот потенциал получаемого на его основе ПБС.

Предложенная общая экспресс-оценка биоразлагаемости изучаемых материалов с помощью балльной системы позволяет дать общую оценку биоразлагаемости ПБС на основе различного сырья и для данных материалов в целом вне зависимости от исходного пресс-сырья (табл. 4).

Оценка биоразлагаемости ПБС на основе различного сырья

Table 4

Assessment of the biodegradability of PWR based on various raw materials

Материал   Material	Общий балл   Total point	Маркерные критерии биоразлагаемости (по приоритетности)   Marker criterion of biodegradability	Оценка биоразлагаемости   Assessment of the biodegradability
ДПс   WPp	4,6	1. Пигментация лицевой поверхности материала 2. Микробиологическое поражение материала 3. Деструкция материала 4. Деформация материала 5. Расслоение / разбухание материала по толщине	Полностью биоразлагаемый материал   Fully biodegradable material
ДПб   WPb	2,2	1. Деформация материала	Малоспособный материал к биодеструкции   Low-capacity material for biodegradation
ДПл   WPl	3,0	1. Пигментация лицевой поверхности материала 2. Микробиологическое поражение материала 3. Деформация материала	Умеренный и/или частичный биоразлагаемый материал   Moderate and/or partial biodegradable material
РПл   RPl	4,6	1. Расслоение / разбухание материала по толщине 2. Деформация материала 3. Деструкция материала 4. Пигментация лицевой поверхности материала 5. Микробиологическое поражение материала	Полностью биоразлагаемый материал   Fully biodegradable material
РПб   RPh	3,0	1. Расслоение / разбухание материала по толщине 2. Деформация материала	Умеренный и/или частичный биоразлагаемый материал   Moderate and/or partial biodegradable material
РПк   RPhs	3,0	1. Расслоение / разбухание материала по толщине 2. Микробиологическое поражение материала	Умеренный и/или частичный биоразлагаемый материал   Moderate and/or partial biodegradable material
РПп   RPwh	3,8	1. Микробиологическое поражение материала 2. Пигментация лицевой поверхности материала 3. Деструкция материала	Материал с высоким потенциалом биодеструкции   Material with high biodegradation potential
Для всех видов ПБС   For all types of PWR	3,5	1. Расслоение / разбухание материала по толщине 2. Деформация материала 3. Микробиологическое поражение материала 4. Пигментация лицевой поверхности материала 5. Деструкция материала	Материал с высоким потенциалом биодеструкции   Material with high biodegradation potential

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Общие маркерные показатели для ПБС, которые в первую очередь будут обуславливать биологическое разрушение материалов на их основе отображены на рис. 8.



Рисунок 8. Общие маркерные морфологические признаки, обуславливающие биоразлагаемость материалов на основе ПБС

Figure 8. Common marker morphological features that determine the biodegradability of PWR-based materials

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

Основываясь на выявленных маркерных признаках биоразлагаемости ПБС на основе древесного и недревесного растительного сырья и имеющихся литературных данных, можно предположить общую последовательность протекающей деструкции при экспозиции в почво-грунте. На начальном этапе происходит насыщение материала водой, содержащаяся в почвенном субстрате, что сопровождается его расслоением и деформацией. Через образовавшиеся свищи на поверхности материала, во внутренние полости материала происходит распространение биологических агентов, присущих почвенной среде. При этом, из-за высокой удельной поверхности исследуемого материала пластика происходит концентрирование области биологического поражения на этой поверхности материала, что приводит к соответствующим поверхностным изменениям, которые характеризуются изменением окраски. На последнем этапе, по совокупности выявленных деструктурирующих изменений, происходит окончательное разрушение материала, сопровождающееся изменением его физических и химических свойств.

Результаты корреляционного анализа выходных факторов эксперимента представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты корреляционного анализа выходных факторов эксперимента

Table 5

Results of the correlation analysis of the output factors of the experiment.

Критерий   Criterion	Д   D	Р   S	Дф   Df	П   P	М   M
Д   D	1,00				
Р   S	0,31	1,00			
Дф   Df	0,37	-0,13	1,00		
П   P	0,69	0,19	0,05	1,00	
М   M	0,49	0,22	-0,53	0,76	1,00

Данные табл. 7 указывают на наличие сильной связи между выходными факторами эксперимента (критериями) «Микробиологическое поражение материала» и «Пигментация лицевой поверхности материала», а также между критериями «Пигментация лицевой поверхности материала» и «Деструкция материала». Между факторами «Деструкция материала» и «Микробиологическое поражение материала» обнаружено наличие корреляционной связи средней силы. Корреляция факторов «Микробиологическое поражение материала» и «Деформация материала» также характеризуется средней силой и отрицательным знаком.

Установленные закономерности между изучаемыми критериями свидетельствуют о их множественных взаимосвязях и косвенно подтверждают предлагаемый механизм протекающей деструкции ПБС по отношению к почво-грунту.

### Заключение

По результатам выполненного исследования можно сделать следующие выводы по оценке биоразлагаемости ПБС на основе различного сырья и апробации предложенной системы балльной оценки степени биоразложения ПБС:

1. Для ПБС на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья возможно применение пяти основных критериев для выполнения экспресс-оценки с целью определения биоразлагаемости исследуемого материала при выдержке 85 суток в почво-грунте.

2. Наиболее потенциальным к биоразложению можно рассматривать ПБС на основе сосны и листового опада, которые максимально деструктируют в почво-грунте за 85 суток.

3. В общем аспекте материалы на основе ПБС можно характеризовать как материалы с высоким потенциалом к биодеструкции.

4. Значения коэффициентов вариации по каждому принятому критерию оценки биоразлагаемости исследуемых материалов на основе ПБС из лигноцеллюлозосодержащего сырья составляет не более 5 %, т.е совокупность значений каждого признака (критерия) является однородной и все предлагаемые критерии обладают существенными признаками.

5. Предлагаемая балльная система по степени биоразложения применима для экспресс-оценки ПБС на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья без учета специальной обработки исходного пресс-сырья (химическая, физическая и биологическая модификация) и готового материала (термическая закатка, обработка гидрофобизаторами и антисептиками), которые могут повлиять и изменять биоразлагаемые свойства исследуемого материала.

### Список литературы

1. Хейфец Б. А., Чернова В. Ю. Система оценки эффективности и мониторинга результатов политики импортозамещения. Экономика региона. 2019; 15 (4): 1266-1278. <https://doi.org/10.17059/2019-4-23>.
2. Медведев С. О., Зырянов М. А., Мохирев А. П. Эффективность лесной отрасли России по федеральным округам: портфельный анализ. Креативная экономика. 2023; 17(2): 713-730. <https://doi.org/10.18334/ce.17.2.117198>.
3. Полянская О. А., Тамби А. А., Михайлова А. Е. Развитие лесопромышленного комплекса Российской Федерации: проблемы и перспективы. Петербургский экономический журнал. 2020; 4: 65-74. <https://doi.org/10.24411/2307-5368-2020-10039>.
4. Daria M., Krzysztof L., Jakub M. Characteristics of biodegradable textiles used in environmental engineering: A comprehensive review. Journal of Cleaner Production. 2020; 268: 122-129. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122129>.
5. Sabirova G., Safin R., Mukhametzyanov S., Galyavetdinov N. Transition to biodegradable composites as a method for solving environmental problems. E3S Web of Conferences, Saint-Petersburg, 23–26 ноября 2020 года. Saint-Petersburg, 2020: 01004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022101004>.
6. Nassar M. M. A., Alzebdeh K. I., Pervez T., Al-Hinai N., Munam A. J. Appl. Polym. Sci. 2021; e51284. URL: [wileyonlinelibrary.com/journal/app](http://wileyonlinelibrary.com/journal/app) 2021.
7. Бурындин В. Г., Вураско А. В., Глухих В. В. [и др.] Получение полимерных материалов из вторичного лигноцеллюлозного сырья. – Екатеринбург, 2022. 188 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49176994>.
8. Adamcová D., Zloch V., Vaverková M. D. [et al.]. Research of the biodegradability of degradable/biodegradable plastic material in various types of environments / Scientific Review Engineering and Environmental Sciences. 2017; 26(1): 3-14. <https://doi.org/10.22630/PNIKS.2017.26.1.01>.
9. Сусоева И. В., Вахнина Т. Н., Ибрагимов А. М. Оценка ресурсного потенциала использования пылевидных лигноцеллюлозных отходов для производства строительных композиционных материалов. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2019; 3(381): 37-41. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41547117>.
10. Просвирников, Д. Б. Моделирование свойств древесно-композиционных материалов методом параметрической идентификации. Системы. Методы. Технологии. 2020; 4 (48): 107-118. DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2020-4-107-118>.
11. Ермолин В. Н., Баяндин М. А., Намятов А. В., Острякова В. А. Структурно-механические свойства гидродинамически активированной древесной массы в аддитивных технологиях // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2023; 2 (392):1 21-131. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-121-131>.

12. Artemov A. V., Buryndin V. G., Krivonogov P. S. et al. An Investigation of Complexes of Lignin Found in Plant Raw Materials as a Natural Binder in Obtaining Plastic in Closed Molds. *Polym. Sci. Ser.* 2023; 16: 278–284. <https://doi.org/10.1134/S1995421223020028>.
13. Бурьиндин В. Г., Бельчинская Л. И., Савиновских А. В. [и др.] Изучение получения древесных и растительных пластиков без связующих в присутствии катализаторов типа полиоксометаллатов. *Лесотехнический журнал*. 2018; 8. 1(29): 128-134. [https://doi.org/10.12737/article\\_5ab0dfc1e37185.35527284](https://doi.org/10.12737/article_5ab0dfc1e37185.35527284).
14. Pekhtasheva E. L., Raikova E. Yu., Chalykh T. I. [et al.] Biodegradation of polycapromamide textile materials. *Bulgarian Chemical Communications*. 2022; 54 (B2): 66-70. <https://doi.org/10.34049/bcc.54.B2.0509>.
15. Веревкин А. Н., Кононов Г. Н., Сердюкова Ю. В., Зайцев В. Д. Биодegradация древесины ферментными комплексами дереворазрушающих грибов. *Лесной вестник*. 2019; 23(5): 95-100. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2019-5-95-100>.
16. Кряжев Д. В., Смирнов В. Ф., Смирнова О. Н. [и др.] Анализ методов оценки биостойкости промышленных материалов (критерии, подходы). *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2013; 2(1): 118-124. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19066914>.
17. Попов А. А. Биоразлагаемые полимерные композиции на основе полиолефинов. Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2021; 63 (6): 384-399. <https://doi.org/10.31857/S2308112021060092>.
18. Остроух О. В., Игнатенко А. В., Болтовский В. С. Анализ биостойкости древесины и защитных покрытий. *Материалы, технологии, инструменты*. 2012; 17 (4): 43-47.
19. Glukhikh V., Buryndin P., Artyemov A. [et al.] Plastics: physical-and-mechanical properties and biodegradable potential. *Foods and Raw Materials*. 2020; 8(1): 149–154. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2020-1-149-154>.
20. Ермолович О. А., Макаревич А. В., Гончарова Е. П., Власова Г. М. Методы оценки биоразлагаемости полимерных материалов. 2005; 4: 47-54. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9567085>.
21. Математическое планирование экспериментов и анализ их результатов с применением компьютерных программ : учебное пособие / В. В. Глухих, А. Е. Шкуро, А. В. Артемов [и др.]. – Екатеринбург, 2023. – 104 с. – ISBN 978-5-94984-864-7. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53945028>.
22. Чубинский М. А., Чаузов К. В. Исследование свойств древесины лиственницы и лиственничных строительных материалов // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2016; 215: 255-265. <https://doi.org/21266/2079-4304.2016.215.255-265>.
23. Глухих В. Н., Охлопкова А. Ю., Сивцев П. В. Исследование коробления и численное моделирование деформации пиломатериалов из древесины лиственницы даурской под действием начальных напряжений ствола дерева // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2018; 222: 188-201. <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2018.222.188-201>.
24. Судакова И. Г., Гарынцева Н. В., Иванов И. П. [и др.]. Выделение и применение суберина из бересты коры березы. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия*. 2012; 5 (2): 168-177. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18065356>.
25. Гельфанд Е. Д., Мелехов В. И., Потыкалова М. В. Механическая деформация древесины как средство увеличения влагопоглощающей способности. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2008; 4: 15. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11927105>.
26. Есбатыр А. Е., Корулькин Д. Ю. Выделение кумаринов для использования в фармацевтической промышленности. *Вестник Казахского национального медицинского университета*. 2016; 4: 328-330. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32403920>.
27. Дубровин М. С. Применение технической конопли в производстве широкого спектра продукции различного назначения. *International Agricultural Journal*. 2022; 65 (2). [https://doi.org/10.55186/25876740\\_2022\\_6\\_2\\_30](https://doi.org/10.55186/25876740_2022_6_2_30).
28. Белопухов С. Л., Байбеков Р. Ф., Жарких О. А. Химический состав масла из семян конопли сорта Сурская. *Вестник науки*. 2019; 9 (18): 57-59. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39252411>.



## References

1. Kheifets B. A., Chernova V. Yu. A system for evaluating the effectiveness and monitoring the results of the import substitution policy. *The economy of the region*. 2019;15(4):1266-1278. <https://doi.org/10.17059/2019-4-23>
2. Medvedev S. O., Zyryanov M. A., Mohirev A. P. Efficiency of the Russian forest industry by federal districts: portfolio analysis. *Creative economy*. 2023; 17(2): 713-730. <https://doi.org/10.18334/ce.17.2.117198>
3. Polyanskaya O. A., Tambi A. A., Mikhailova A. E. Development of the timber industry complex of the Russian Federation: problems and prospects. *St. Petersburg Economic Journal*. 2020; 4: 65-74. <https://doi.org/10.24411/2307-5368-2020-10039>
4. Daria M., Krzysztof L., Jakub M. Characteristics of biodegradable textiles used in environmental engineering: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 268: 122-129. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122129>.
5. Sabirova G., Safin R., Mukhametzyanov S., Galyavetdinov N. Transition to biodegradable composites as a method for solving environmental problems. *E3S Web of Conferences*, Saint Petersburg, November 23-26, 2020. Saint-Petersburg, 2020: 01004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022101004>.
6. Nassar M. M. A., Alzebedeh K. I., Pervez T., Al-Hinai N., Munam A. J. *Appl. Polym. Sci.* 2021; e51284. URL: [wileyonlinelibrary.com/journal/app2021](http://wileyonlinelibrary.com/journal/app2021).
7. Buryndin V. G., Vurasko A. V., Glukhikh V. V. [et al.] Production of polymer materials from secondary lignocellulose raw materials. Yekaterinburg, 2022. 188 p. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49176994>.
8. Adamcová D., Zloch V., Vaverková M. D. [et al.]. Research of the biodegradability of degradable/biodegradable plastic material in various types of environments / *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*. 2017; 26(1): 3-14. <https://doi.org/10.22630/PNIKS.2017.26.1.01>.
9. Susoeva I. V., Vakhnina T. N., Ibragimov A. M. Assessment of the resource potential of using pulverized lignocellulose waste for the production of building composite materials. *News of higher educational institutions. Technology of the textile industry*. 2019; 3(381): 37-41. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41547117>.
10. Prosvirnikov D. B. Modeling the properties of wood composite materials by parametric identification method. *The system. Methods. Technologies*. 2020; 4 (48): 107-118. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2020-4-107-118>.
11. Ermolin V. N., Bayandin M. A., Namyatov A. V., Ostryakova V. A. Structural and mechanical properties of hydrodynamically activated wood pulp in additive technologies // *Izvestia of higher educational institutions. Forest magazine*. 2023; 2 (392): 121-131. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-121-131>.
12. Artemov A. V., Buryndin V. G., Krivonogov P. S. et al. An Investigation of Complexes of Lignin Found in Plant Raw Materials as a Natural Binder in Obtaining Plastic in Closed Molds. *Polym. Sci. Ser.* 2023; 16: 278-284. <https://doi.org/10.1134/S1995421223020028>.
13. Buryndin V. G., Belchinskaya L. I., Savinovskikh A. V. [et al.] Study of the production of wood and vegetable plastics without binders in the presence of catalysts such as polyoxometallates. *Forestry journal*. 2018; 8. 1(29): 128-134. [https://doi.org/10.12737/article\\_5ab0dfc1e37185.35527284](https://doi.org/10.12737/article_5ab0dfc1e37185.35527284).
14. Pekhtasheva E. L., Raikova E. Yu., Chalykh T. I. [et al.] Biodegradation of polycapramide textile materials. *Bulgarian Chemical Communications*. 2022; 54 (B2): 66-70. <https://doi.org/10.34049/bcc.54.B2.0509>.
15. Verevkin A. N., Kononov G. N., Serdyukova Yu. V., Zaitsev V. D. Biodegradation of wood by enzyme complexes of wood-destroying fungi. *Forest Bulletin*. 2019; 23(5):95-100. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2019-5-95-100>.
16. Kryazhev D. V., Smirnov V. F., Smirnova O. N. [et al.] Analysis of methods for assessing the biostability of industrial materials (criteria, approaches). *Bulletin of the Nizhny Novgorod University named after N.I. Lobachevsky*. 2013; 2 (1): 118-124. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19066914>.
17. Popov A. A. Biodegradable polymer compositions based on polyolefins. High molecular weight compounds. *Series A*. 2021; 63 (6): 384-399. <https://doi.org/10.31857/S2308112021060092>.



18. Ostroukh O. V., Ignatenko A. V., Boltovsky V. S. Analysis of biostability of wood and protective coatings. *Materials, technologies, tools*. 2012; 17(4): 43-47.
19. Glukhikh V., Buryndin P., Artyemov A. [et al.] Plastics: physical-and-mechanical properties and biodegradable potential. *Foods and Raw Materials*. 2020; 8(1): 149-154. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2020-1-149-154>.
20. Ermolovich O. A., Makarevich A. V., Goncharova E. P., Vlasova G. M. Methods for assessing the biodegradability of polymer materials. 2005; 4: 47-54. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9567085>.
21. Glukhikh V. V., Shkuro A. E., Artyomov A. V. [et al.] Mathematical planning of experiments and analysis of their results using computer programs : a textbook. Yekaterinburg, 2023; 104 p. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53945028>.
22. Chubinsky M. A., Chauzov K. V. Investigation of the properties of larch wood and larch building materials. *Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy*. 2016; 215: 255-265. <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2016.215.255-265>.
23. Glukhikh V. N., Okhlopkova A. Yu., Sivtsev P. V. Study of warping and numerical modeling of deformation of sawn timber from Daurian larch wood under the action of initial stresses of the tree trunk. *Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy*. 2018; 222: 188-201. <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2018.222.188-201>.
24. Sudakova I. G., Garyntseva N. V., Ivanov I. P. [et al.]. Isolation and application of suberin from birch bark bark. *Journal of the Siberian Federal University. Series: Chemistry*. 2012; 5 (2): 168-177. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18065356>.
25. Gelfand E. D., Melekhov V. I., Potykalova M. V. Mechanical deformation of wood as a means of increasing moisture absorption capacity. *News of higher educational institutions. Forest magazine*. 2008; 4: 15. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11927105>.
26. Esbatyr A. E., Korulkin D. Y. Isolation of coumarins for use in the pharmaceutical industry. *Bulletin of the Kazakh National Medical University*. 2016; 4: 328-330. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32403920>.
27. Dubrovin M. S. The use of technical cannabis in the production of a wide range of products for various purposes. *International Agricultural Journal*. 2022; 65 (2). [https://doi.org/10.55186/25876740\\_2022\\_6\\_2\\_30](https://doi.org/10.55186/25876740_2022_6_2_30).
28. Belopukhov S. L., Baibekov R. F., Zharkikh O. A. Chemical composition of hemp seed oil of the Surskaya variety. *Bulletin of Science*. 2019; 9 (18): 57-59. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39252411>.

### Сведения об авторах

✉ *Артёмов Артём Вячеславович* – кандидат техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», ул. Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620100, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6994-0154>, e-mail: [artemovav@m.usfeu.ru](mailto:artemovav@m.usfeu.ru).

*Ершова Анна Сергеевна* – ассистент, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», ул. Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620100. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6248-0028>, [ershovaas@m.usfeu.ru](mailto:ershovaas@m.usfeu.ru).

*Шкуро Алексей Евгеньевич* – доктор техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», ул. Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620100, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0469-2601>, e-mail: [shkuroae@m.usfeu.ru](mailto:shkuroae@m.usfeu.ru).

*Буриндин Виктор Гаврилович* – доктор техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», ул. Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620100. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6900-3435>, [buryndinvg@m.usfeu.ru](mailto:buryndinvg@m.usfeu.ru).

### Information about the authors

✉ *Artyom V. Artyomov* – can. sci. (techn), Associate Professor, Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt str., 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6994-0154>, e-mail: [artemovav@m.usfeu.ru](mailto:artemovav@m.usfeu.ru).

*Anna S. Ershova* – assistant, Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt str., 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0001-6248-0028>, [ershovaas@m.usfeu.ru](mailto:ershovaas@m.usfeu.ru).

*Aleksey E. Shkuro* – Dr. sci. (techn), Associate Professor, Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt str., 37, Yekaterinburg, 620100, <https://orcid.org/0000-0002-0469-2601>, [shkuroae@m.usfeu.ru](mailto:shkuroae@m.usfeu.ru).

*Victor G. Buryndin* – Dr. sci. (techn), professor, Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt str., 37, Yekaterinburg, 620100, <https://orcid.org/0000-0001-6900-3435>, [buryndinv@m.usfeu.ru](mailto:buryndinv@m.usfeu.ru).

✉ – Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/9>

УДК 544.777 : 622.367.62



## Применение винил- и винилиден-хлоридных латексов при изготовлении асбестового картона

Геннадий И. Мальцев<sup>1</sup>✉, maltsewg@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0750-0070>

Юрий Л. Юрьев<sup>2</sup>, charekat@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-1187-7401>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, 620100, Российская Федерация

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, 620100, Российская Федерация

Необходимость создания недорогого бумагоподобного материала на основе минеральных волокон обусловлена защитой теплоизоляции трубопроводов. Использованные материалы: минеральные волокна – асбест сорта М-4-20; связующее – винил- и винилиден-хлоридные латексы ВХВД-65, ДВХБ-70; коагулянт – сульфат алюминия. Применяемый метод: изготовление в листоотливном аппарате «ТАРПИ» образцов асбестового картона из волокнистой композиции, мас. ч.: 100 асбестовое волокно; 5–60 латекс; 3–10 коагулянт. Для каждого состава волокнистой композиции отливали 10 образцов для испытания. Свойства материала характеризуют физико-механические показатели: разрывная длина ( $L$ , м); сопротивление раздиранию ( $E$ , мН) и продавливанию ( $P_0$ , кПа); впитываемость при одностороннем смачивании ( $G$ , г/м<sup>2</sup>) и капиллярная ( $B$ , мм); степень проклейки ( $C$ , с/мм). Результаты: прочность отливок зависит от природы, содержания связующего и коагулянта: для латексов ДВХБ-70/ ВХВД-65 –  $L_{max} = (504–662)/(384–417)$  с уровнем значимости  $\alpha = 0,05$  в композиции, мас.ч.: 5–20 латекс; 3–6 коагулянт;  $L_{min} = 206/(132–168)$  с  $\alpha = 0,05$  в композиции, мас.ч.: 25–60 латекс; 7–10 коагулянт;  $P_{0(max)} = (14–15)/20$  кПа с  $\alpha = 0,05$  при содержании 10/(10–20) мас.ч. латекса. Образцы с ВХВД-65 гидрофильные:  $G_{max} / B_{max} = (2–3)/(4–5)$  с  $\alpha = 0,05$ . При увеличении содержания ДВХБ-70 значения  $G$  уменьшаются с 1–3 до нуля с  $\alpha = 0,05$ ;  $B \approx 0$  при любом содержании ДВХБ-70. Результаты означают: в теории – физико-механические свойства асбестового картона определяются пленкообразующими свойствами связующих – синтетических латексов; на практике – определены составы волокнистых суспензий для получения защитного материала с высокими потребительскими свойствами. Заключение: ключевым преимуществом для читателей является практическое подтверждение возможности создания новых композиционных материалов с ингредиентами различной природы – минеральной и органической. Нерешенным остается ассортимент латексов с другими мономерами, пригодными для получения асбестового картона.

**Ключевые слова:** латекс, асбестовый картон, разрывная длина, сопротивление раздиранию, сопротивление продавливанию, впитываемость при одностороннем смачивании и капиллярная, степень проклейки

**Финансирование:** данное исследование не получало внешнего финансирования.

**Благодарности:** авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Мальцев, Г. И. Применение винил- и винилиден-хлоридных латексов при изготовлении асбестового картона / Г. И. Мальцев, Ю. Л. Юрьев // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 1 (53). – С. 151–169. – Библиогр.: с. 163–169 (44 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/9>.

Поступила 01.02.2024. Пересмотрена 19.02.2024. Принята 22.02.2024. Опубликована онлайн 20.03.2024.

Article

## The use of vinyl and vinylidene chloride latexes in the manufacture of asbestos cardboard

Gennady I. Maltsev <sup>1</sup>✉, maltsewg@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-0750-0070>

Yuri L. Yuryev<sup>2</sup>, charekat@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-1187-7401>

<sup>1</sup>Ural State University of Forestry and Technologies, Siberian Highway, 37, Ekaterinburg city, 620100, Russian Federation

<sup>2</sup>Ural State University of Forestry and Technologies, Siberian Highway, 37, Ekaterinburg city, 620100, Russian Federation

### Abstract

The need to create an inexpensive paper-like material based on mineral fibers is due to the protection of thermal insulation of pipelines. Materials used: mineral fibers – asbestos grades M-4-20; binder – vinyl- and vinylidene-chloride latexes VKHVD-65, DVKHB-70; coagulant – aluminum sulfate. Method used: production of samples of asbestos cardboard from a fibrous composition in a TAPPI sheet-filling machine, wt. h.: 100 asbestos fiber; 5–60 latex; 3–10 coagulant. For each composition of the fibrous composition, 10 samples were cast for testing. The properties of the material are characterized by physical–mechanical parameters: breaking length (L, m); tear resistance (E, mN) and penetration (P<sub>o</sub>, kPa); absorbency during unilateral wetting (G, g/m<sup>2</sup>) and capillary (B, mm); degree of sizing (C, c/mm). Results: the strength of castings depends on the nature, binder and coagulant content: for latexes DVKHB-70/ VKHVD-65 –  $L_{\max} = (504–662)/(384–417)$  with a significance level of  $\alpha = 0.05$  in the composition, wt.h.: 5–20 latex; 3–6 coagulant;  $L_{\min} = 206/(132–168)$  with  $\alpha = 0.05$  in composition, wt.h.: 25–60 latex; 7–10 coagulant;  $P_{o(\max)} = (14–15)/20$  kPa with  $\alpha = 0.05$  at a content of 10/(10–20) wt.h. latex. Samples with VKHVD-65 are hydrophilic:  $G_{\max} / B_{\max} = (2–3)/(4–5)$  with  $\alpha = 0.05$ . With an increase in the content of DVKHB-70, the values of G decrease from 1–3 to zero with  $\alpha = 0.05$ ;  $B \approx 0$  for any content of DVKHB-70. The results mean: in theory, the physical and mechanical properties of asbestos cardboard are determined by the film-forming properties of binders – synthetic latexes; in practice, the compositions of fibrous suspensions for obtaining a protective material with high consumer properties are determined. Conclusion: a key advantage for readers is the practical confirmation of the possibility of creating new composite materials with ingredients of various natures – mineral and organic. The range of latexes with other monomers suitable for the production of asbestos cardboard remains unresolved.

**Keywords:** latex, asbestos cardboard, breaking length, tearing resistance, punching resistance, absorbency with unilateral wetting and capillary, degree of sizing

**Funding:** this research received no external funding.

**Acknowledgments:** authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Maltsev G. I., Yuryev Y.L. (2024). The use of vinyl and vinylidene chloride latexes in the manufacture of asbestos cardboard. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 1 (53), pp. 151-169 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/9>.

*Received* 01.02.2024. *Revised* 19.02.2024. *Accepted* 22.02.2024. *Published online* 20.03.2024.

### Введение

Традиционные технологии получения конструкционных изделий на основе органического наполнителя (целлюлоза, бумажная масса, древесная щепа и др.) предусматривают использование связующего, в качестве которого выступают как товарные, так и промежуточные продукты органического синтеза. Например, С.Н. Вьюнков [1] отмечает отверждение карбамидоформальдегидных смол (КФС) с различным мольным соотношением в системе карбамид : формальдегид. Так, при мольном соотношении карбамид : формальдегид 1 : 2 процесс отверждения направлен в сторону образования межмолекулярных связей – метиленовых и метилэфирных, о чем свидетельствует снижение содержания гидроксиметильных групп. Позднее С.Н. Вьюнков и В.В. Васильев [2] применили КФС с низким мольным соотношением формальдегида и карбамида – 1,0 и менее для снижения токсичности древесностружечных плит. Новые смолы содержат много несвязанного карбамида, водный раствор которого имеет слабо щелочной характер и нейтрализует часть отвердителя. Для устранения этих недостатков предлагается использовать добавку формальдегида в виде его водного раствора – формалина. А.А. Федотов и др. [3] в качестве рационального стабилизатора свойств КФС рекомендовали добавку триэтанолamina в количестве 0,2 % от веса КФС. А.А. Леонович и др. [4] вводили в древесное волокно (смесь березы и осины) антипирен на основе гидроксипропилен-дифосфоновой кислоты, массу обрабатывали меламинакарбамидоформальдегидным связующим, формировали ковер и прессовали огнезащитные древесноволокнистые плиты средней плотности.

Т.Н. Вахнина и др. [5] для производства фанеры повышенной водостойкости (марки «ФСФ») использовали фенолоформальдегидный олигомер (ФФС). Исследование процесса желатинизации в присутствии большого количества модифицирующих добавок (более 1,5 %) выявило существенное ухудшение растекаемости связующего, поэтому рекомендуется использовать ускорители отверждения ФФС в количестве, не превышающем 1–1,5 %. А.А. Федотов и др. [6,7] для совершенствования качества водостойкой фанеры ФСФ предлагают снижение

температуры прессования и введение модифицирующих добавок в количестве 0,25–1,5 %, повышающих адгезионную и когезионную прочность фенолоформальдегидного связующего: водные растворы шестиводного хлорида алюминия; безводного хлорида магния; восьмиводного сульфата цинка; сульфосалициловой кислоты; диметилглиоксима. Установлено, что при увеличении доли добавки диметилглиоксима до 1,5 % прочность фанеры при скалывании увеличивается на 25 %, прочность при статическом изгибе – на 30 %, разбухание по толщине – на 10 %. Это позволяет сделать вывод об углублении процесса структурообразования фанеры ФСФ при прессовании на модифицированном связующем.

Н.С. Никулина и др. [8] применили для природной древесины пропиточный состав на основе побочных продуктов производства полибутадиена и метилметакрилата, % мас.: 4-винилциклогексен – 36,4; толуол – 45,6; тяжелый остаток (тримеры бутадиена и другие продукты) – 18. Приготовленные олигомерные растворы после введения сиккатива (4–6 % на олигомер) использовали для изготовления древесно-полимерных композитов. Обработка древесины березы олигомером позволяет улучшить такие свойства древесины, как водопоглощение, разбухание в тангенциальном и радиальном направлениях. А.И. Дмитренко и др. [9,10] разработали и исследовали новые составы для обработки природной древесины на основе отработанного растительного масла с добавками наноразмерного оксида кремния для получения древесного композита с улучшенными свойствами. В состав композиций вводили добавки нанопорошков аморфного и кристаллического оксида кремния в дозировке от 0,01 до 0,5 %. Полученные древесные композиты с добавками наноразмерного оксида кремния имели улучшенные гидрофобные свойства древесины (увеличение краевого угла смачивания на 30 %), повышенную влаго- и водостойкость (в 11 и 14 раз, соответственно), а также уменьшенное разбухание в тангенциальном (в 4 раза) и радиальном (в 5 раз) направлениях. Выбрана оптимальная дозировка нанопорошков оксида кремния (0,01 %). Пропиточные составы на основе

отработанного растительного масла обладают низкой токсичностью, и их использование позволяет утилизировать отходы производства.

А.В. Артёмов и др. [11] получили образцы пластика без связующего (ПБС) на основе древесного наполнителя в различном соотношении модификации лигнина с минеральными веществами путем реализации способа золь-гель технологии. пресовались в герметичной пресс-форме под давлением 40 МПа и при температуре 180 °С с последующим ее уменьшением без снятия давления до 40 °С. Результатами испытаний на минимальные необходимые свойства для отделочных материалов (показатели прочности, водо- и биостойкости, декоративности) установлено рациональное соотношение пресс-композиции с содержанием гидролизованного лигнина в интервале 40–60 %. А.В. Лоренцон и др. [12] показали, что максимальное осаждение сульфатного лигнина (СЛ) наблюдается в интервале рН 4–6 в присутствии  $10^{-4}$  М  $Al_2(SO_4)_3$ .

Для улучшения характеристик связующего и физико-химических свойств готового изделия проводят модификацию этого компонента исходной массы. А.Б. Дягилева и А.И. Смирнова [13] использовали композиции на основе технических лигнинов и кремниевых минеральных композиций на основе нафтилфталаминовой кислоты (НФК) для получения огнезащитных материалов для обработки деревянных конструкций. Основным механизмом действия композиций заключается в процессе коксообразования на поверхности древесины за счет реакций твердофазного ингибирования целлюлозной матрицы. Происходит модификации лигнина с минеральными веществами путем реализации способа золь-гель технологии. Л.И. Бельчинская и др. [14] обнаружили положительное влияние ультразвукового диспергирования на исследованную систему, заключающееся в повышении степени дисперсности наполнителя пропиточного состава и переходе системы «отработанное моторное масло – 1 % муки хвойных пород древесины» в более гомогенное состояние. Этот факт стимулирует массоперенос частиц композиционного состава в объём древесины, повышая её гидрофобность, что установлено по результатам влагопоглощения образцов древесины берёзы. Наибольшее снижение влагопоглощения (19 %) отмечено

при использовании пропиточного состава, подвергнутого ультразвуковому диспергированию.

В.К. Дубовый и Н.А. Криницин [15] исследовали композиционный материал на основе минерального волокна (стеклянных волокон) с использованием в качестве связующего полиядерных комплексов металлов, в частности титана. Добавление связующего на основе в композицию целесообразно в интервале 5–30 % от массы волокна. В.К. Дубовый и Г.А. Суслов [16] изучали влияние минерального и органического связующего на термостойкость (300 °С) и показатель разрушающего усилия композиционных сорбционных материалов на основе стеклянных волокон. Для достижения требуемых параметров для материала исследовались три типа связующего:

- полиядерные комплексы алюминия, полученные при гидролизе хлорида алюминия;
- полиядерные комплексы алюминия, полученные при гидролизе сульфата алюминия;
- сульфатная небеленая целлюлоза.

Выявлено наиболее подходящее связующее для сорбционного композиционного материала: полиядерные комплексы алюминия, полученные при гидролизе хлорида алюминия, в интервале 20–30 % от массы волокна.

S.K. Bagchi [17], D. Sharma [18], A. Steephen [19] отмечали, что процессы производства целлюлозы и бумаги, волокнистых бумагоподобных материалов связаны с потреблением больших количеств воды (150–500 м<sup>3</sup>/т) и относятся к числу наиболее экологически опасных, поскольку сопровождаются образованием сложных по составу, загрязненных сточных вод, содержащих трудно окисляемые вещества и токсичные соединения, сброс которых вызывает устойчивое загрязнение природных водоемов.

A. Romani [20], M. Yang [21], L. Axelrod [22] предлагают для уменьшения антропогенного воздействия на окружающую среду предприятий целлюлозно-бумажной промышленности осуществление комплекса природоохранных мероприятий, включающих разработку экологически чистых (малоотходных и безотходных) технологических процессов, применение нового оборудования и видов сырья, обезвреживание и ликвидацию опасных отходов.

N.M. Taylor [23], D. Elovenko [24], S.M. Fitzgerald [25] считают ключевой задачей при создании экологически чистых производств разработку и внедрение нетрадиционных технологических процессов и оборудования. Новые технологии позволяют решать проблемы использования сырьевых и энергетических ресурсов, существенно снижать материалоемкость, энергоемкость и трудоемкость производства за счет использования положений физической и коллоидной химии, трактующих процессы взаимодействия ингредиентов волокнистой суспензии – целлюлозных и асбестовых волокон с дисперсиями синтетических латексов и реагентов на основе канифоли, в частности, с использованием теории устойчивости лиофобных коллоидов Дерягина–Ландау–Фервея–Овербека (ДЛФО).

A. Obmiński [26], Y. Akylbekov [27], C. Avataneo [28] участвуют в разработке экологически безопасных технологий, изготавливают конструктивные материалы, асбестовый картон различного технического назначения (покровные материалы для защиты теплоизоляции трубопроводов и оборудования; биологически стойкая подоснова для линолеума и кровельных материалов; облицовочный ламинат и др.), обладающий высокой негорючестью, устойчивостью в воде и агрессивных средах. Y. Tap [29], R.S. Castoldi [30], A. Vakatovich [31] утилизируют ограниченно используемый низкосортный коротковолокнистый хризотил-асбест, по запасам которого Российская Федерация занимает второе место в мире.

Y. Geng [32] использует в качестве регуляторов агрегативной и сорбционной устойчивости дисперсной фазы проклеивающих агентов (синтетические латексы, реагенты на основе канифоли) – смешанных Al-Fe- и по J. Yi [33] Fe-содержащих коагулянтов, полученных из природных видов сырья (нефелины, бокситы, каолины, алуниты) и промышленных отходов (красные шламы производства глинозема, некондиционные железные руды высокожелезистые бокситы, колчеданные огарки), что по мнению H. Zeng [34], J. Chen [35], H. Karyab [36] является альтернативой дорогим сульфату алюминия и гидроксиду алюминия.

A. Milbrandt [37] считает проклейку результатом сложных коллоидно-химических взаимодей-

ствий волокнистых, гидрофобизирующих, наполняющих и коагулирующих материалов. A. Kuffel [38], M.H. Mazaherifar [39], S. Mahdi [40] подчеркивают влияние на потребительские свойства фабриката условий проклейки: агрегативная и адсорбционная устойчивость дисперсий; поверхностное натяжение; вязкость; температура; pH; жесткость производственной воды; степень гидрофобности поверхности частиц и др. M. Strozzi [41], K. Chen [42] утверждают, что при изготовлении бумаги и картона из органических волокон механическую прочность листа обуславливают межволоконные связи в бумаге, в первую очередь, водородные связи, обеспечивающие три четверти общей прочности межволоконных связей. Наряду с водородными связями известную роль играют и силы Ван-дер-Ваальса, а также силы трения между волокнами.

При использовании асбестовых волокон, которые сами по себе не образуют прочных межволоконных связей, для придания прочности готовым изделиям в качестве связующего обычно используют синтетические латексы. Проклейка асбестового волокна латексом – сложный процесс, зависящий от многих факторов, связанных между собой. J. Zhang [43] уверен, что главное условие высоких показателей асболатексных бумаг и картонов – равномерность осаждения полимера латекса на волокне и высокие адгезионные качества связующего, способствующие образованию прочной связи в системе «волокно–полимер».

Цель исследования – установление влияния концентрации и природы синтетических латексов на физико-механические свойства бумагоподобного материала – асбестового картона.

### Материалы и методы

#### *Объект и предмет исследований*

Объекты исследования – компоненты волокнистой суспензии:

– хризотил-асбест сорта М-4-20 (ГОСТ 12871) характеризуется следующими физико-техническими показателями:

а) химический состав приблизительно соответствует формуле  $3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ;

б) плотность 2,4–2,6 г/см<sup>3</sup>,

в) температура плавления 1450–1500 °С,

г) термостойкость (потеря конституционной воды и прочности): при длительном постоянном нагреве 500 °С, при кратковременном нагреве 700 °С,

д) щелочестойкость высокая: содержание растворимых веществ в 25% КОН при кипячении в течение 4 ч не более 5%,

е) кислотостойкость слабая: содержание растворимых веществ в НС1 плотностью 1,19 г/см<sup>3</sup> при кипячении в течение 4 ч до 57 %,

ж) удельное сопротивление 10<sup>8</sup> Ом·см,

з) коэффициент преломления 1,5–1,57;

и) содержание конституционной влаги 13,46 %.

По текстуре М-4-20 относится к мягкой группе, вырабатываемой из руд механизированной добычи; 4 – сорт, 20 % – гарантируемый минимальный остаток волокна на основном сите контрольного аппарата.

– латекс ВХВД-65 (ТУ 2241-336-05763458-2002) негорюч, малоопасен, пожаровзрывобезопасен; сополимер винилхлорида с винилиденхлоридом в соотношении 35:65 %; химическая формула:  $[-(-\text{CH}_2-\text{CHCl})_k(-\text{CH}_2-\text{CCl}_2)_e-]_n$ ; массовая доля сухих веществ, не менее 4 %; поверхностное натяжение, не более 0,05/0,10 Н/м; массовая доля (остаточный мономер), %: 0,03 винилхлорид; 0,01 винилиденхлорид;

– латекс ДВХБ-70 (ТУ 38-303-04-03-90) водная дисперсия сополимера винилиденхлорида и бутадиена в соотношении 70:30 %; массовая доля сухого вещества, %, не менее 26,0; массовая доля летучих непредельных соединений, %, не более 0,50, в т.ч. массовая доля углеводородов C<sub>2</sub> – C<sub>4</sub>, %, не более 0,02. Показатели пленок на основе латекса: условная прочность при растяжении невулканизированной пленки, не менее 1,52 Мпа; прочность склеивания ткани латексом, не менее 0,25 Мпа; массовая доля хлора в каучуке 35,0-37,0 %.

– сульфат алюминия (ГОСТ 12966).

Предмет исследований – физико-механические показатели опытных образцов асбестового картона:

– разрывная длина  $L$ , м (ГОСТ ИСО 1924-1);

– сопротивление раздиранью  $E$ , мН (ГОСТ 13525.3);

– сопротивление продавливанию  $P_0$ , кПа (ГОСТ Р ИСО 2758);

– впитываемость при одностороннем смачивании  $G$ , г/м<sup>2</sup> (ГОСТ 12605);

– капиллярная впитываемость  $B$ , мм (ГОСТ 12602);

– степень проклейки  $C$ , с/мм (ГОСТ 8049):

### *Дизайн эксперимента*

В качестве связующих рассмотрена возможность применения латексов: ВХВД-65 – сополимер винилхлорида и винилиденхлорида (CH<sub>2</sub> = CCl<sub>2</sub>), пластифицированный диоктилфталатом; ДВХБ-70 – сополимер винилиденхлорида с бутадиеном, в котором бутадиен служит «внутренним» пластификатором. Латексы на основе поливинилхлорида содержат частицы 50–500/1000 нм, эмульгированные мылами высших жирных кислот, солями парафиновых моносulfоокислот (до 20 атомов углерода) и др.; обладают химической, бензо- и маслостойкостью, низкой горючестью и газопроницаемостью, склонны к отщеплению хлороводорода. Поливинилхлорид – типичный пластик, его пластифицируют введением низкотемпературного диоктилфталата или смешивают с эластомерным бутадиен-нитрильным латексом. Исследованными латексами проклеивали асбестовые волокна сорта М-4-20; в качестве коагулянта использовали сульфат алюминия.

Изготовление опытных образцов и определение физико-механических показателей асбестового картона выполнены по традиционной методике, описанной В.К. Дубовным и др. [44].

Лабораторные образцы асбестового картона листовой формы с массой ~80 г/м<sup>2</sup> изготавливали из хризотил-асбеста с добавками связующего и коагулянта в заданных соотношениях.

Роспуск минерального волокна массой 100 г производили в 1,0 дм<sup>3</sup> воды на мешалке при скорости 300 об/мин в течение 5 мин. В полученную суспензию при перемешивании добавляли 5–60 г латекса, выдерживали систему в течение 2–3 мин для равномерного распределения всех компонентов в объеме. Проклейку минеральных волокон латексом осуществляли введением в суспензию раствора коагулянта – сульфата алюминия, в количестве 3–10 г в пересчете на Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>. После окончания проклейки через 10 мин волокнистую суспензию



разбавляли до 3 дм<sup>3</sup> и помещали в формующую колбу лабораторного листоотливного аппарата «ТАРРИ». Полученные образцы материала сушили до постоянной массы (г/м<sup>2</sup>), затем кондиционировали (по ГОСТ 13523) и определяли их толщину (по ГОСТ 27015) для расчета показателей механической прочности. Для каждого состава волокнистой массы готовили 10 образцов для последующих испытаний.

### *Анализ данных*

Использован метод первичной статистической обработки экспериментальных данных, которые позволяют получать непосредственные первичные статистические показатели, отражающие результаты испытаний, проведенных в ходе эксперимента.

Показателями первичных методов обработки опытных данных являются точечные оценки:

– выборочное среднее (среднее арифметическое), как средняя оценка изучаемого качества:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

где  $n$  – число опытов;  $x_i$  – значение параметра в опыте;

– разброс (размах), равный разности между максимальным и минимальным значениями в выборке:

$$\Delta x = x_{max} - x_{min} \quad (2)$$

– дисперсия, равная среднему арифметическому квадратов отклонений значений переменной от их среднего значения, что позволяет оценить степень вариации данных в выборке:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4)$$

где  $\sigma^2$  – выборочная дисперсия;  $s^2$  – исправленная дисперсия

Более информативными являются интервальные оценки, которые с определенной степенью точности оценивают испытываемый параметр генеральной совокупности. Интервальная оценка задается двумя границами интервала, в котором находится оцениваемая характеристика. Используют доверительные интервалы, которые соответствуют заранее заданной доверительной вероятности и в которых находится неизвестный параметр генеральной совокупности. Интервальной оценке соответствует доверительная вероятность или надежность, с которой

этот интервал покрывает неизвестный параметр генеральной совокупности. На практике, наряду с доверительной вероятностью ( $p$ ), используют уровень значимости:  $\alpha = (1 - p)$ .

Интервальной оценкой параметра  $G$  служит доверительный интервал с границами  $l_1$  и  $l_2$ , которые являются функциями выборочных значений  $x_1, x_2 \dots x_n$  и который с заданной доверительной вероятностью  $p = 0,90-0,99$  накрывает оцениваемый параметр  $G$ :

$$P\{l_1 < G \leq l_2\} = P \quad (5)$$

Статистическая обработка результатов испытаний опытных отливок асбестового картона, выполненная с использованием программного пакета «Statistica», показала, что исследованные физико-механические характеристики определены с доверительной вероятностью  $p = 0,95$  и уровнем значимости  $\alpha = 0,05$ .

### Результаты

Максимальные значения разрывной длины ( $L$ ) образцов выявлены при невысоком содержании латексов и коагулянта, мас.ч.: 5,0/20,0 ДВХБ-70/ВХВД-65; 3–6  $Al_2(SO_4)_3$ , а именно ДВХБ-70/ВХВД-65, м:  $L_{max} = (504-662)/(384-417)$ . При четырехкратном превышении содержания латекса ВХВД-65 по отношению к ДВХБ-70 и двухкратном – сульфата алюминия, тем не менее, разрывная длина на 24–38 % ниже для материала со связующим ВХВД-65. При увеличении количества ДВХБ-70/ВХВД-65 в исходной композиции до (20–40)/(40–60) мас.ч. и сульфата алюминия до 10 мас.ч., значения разрывной длины снижаются до минимальных значений:  $L_{min} = 206/(132-168)$  (рис. 1а, 2а), вследствие изменения режима осаждения связующего на минеральных волокнах – вместо равномерного распределения латексов между волокнами хризотил-асбеста наблюдается интенсивное комкование волокнистой массы, нарушение внутренней структуры материала, во многом обеспечивающей его прочностные свойства.

В отличие от монотонно убывающих значений разрывной длины асбокартона при увеличении содержания ДВХБ-70, для сопротивления раздираанию ( $E$ ) выявлена экстремальная зависимость от содержания связующего, характерная для обоих латексов, а именно, при 20 мас.ч. ДВХБ-70/ВХВД-65  $E_{max} = (1840-1856)/(3200-3392)$  мН.

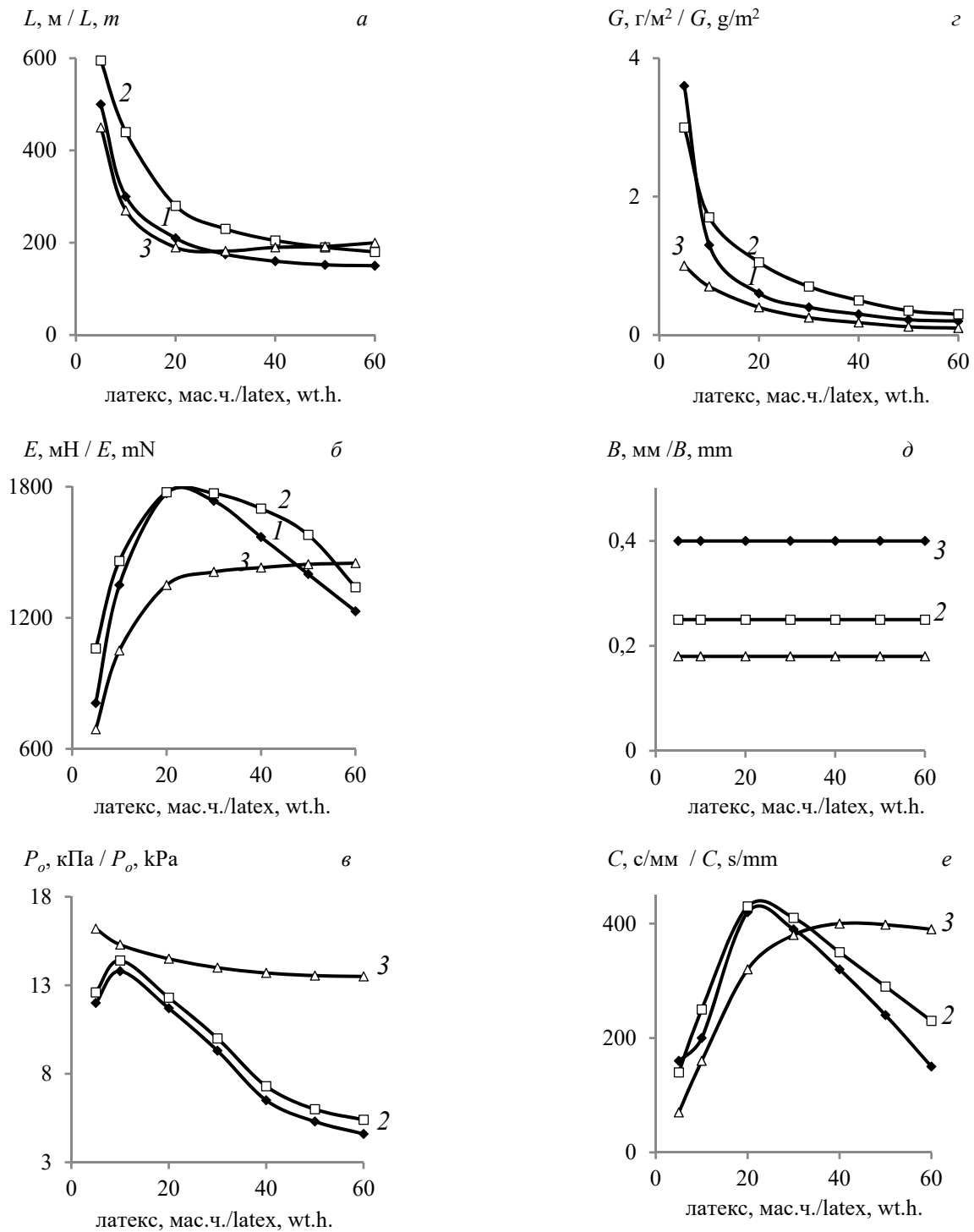


Рисунок 1. Зависимость физико-механических показателей картона от содержания латекса ДВХБ-70 и сульфата алюминия, мас.ч.: 3,0 (1); 6,0 (2); 10,0 (3)  
 Figure 1. Dependence of physical and mechanical parameters of cardboard on the content latex DVHB-70 and aluminum sulfate, wt.h.: 3,0 (1); 6,0 (2); 10,0 (3)

Источник: собственная композиция авторов  
 Source: author's composition

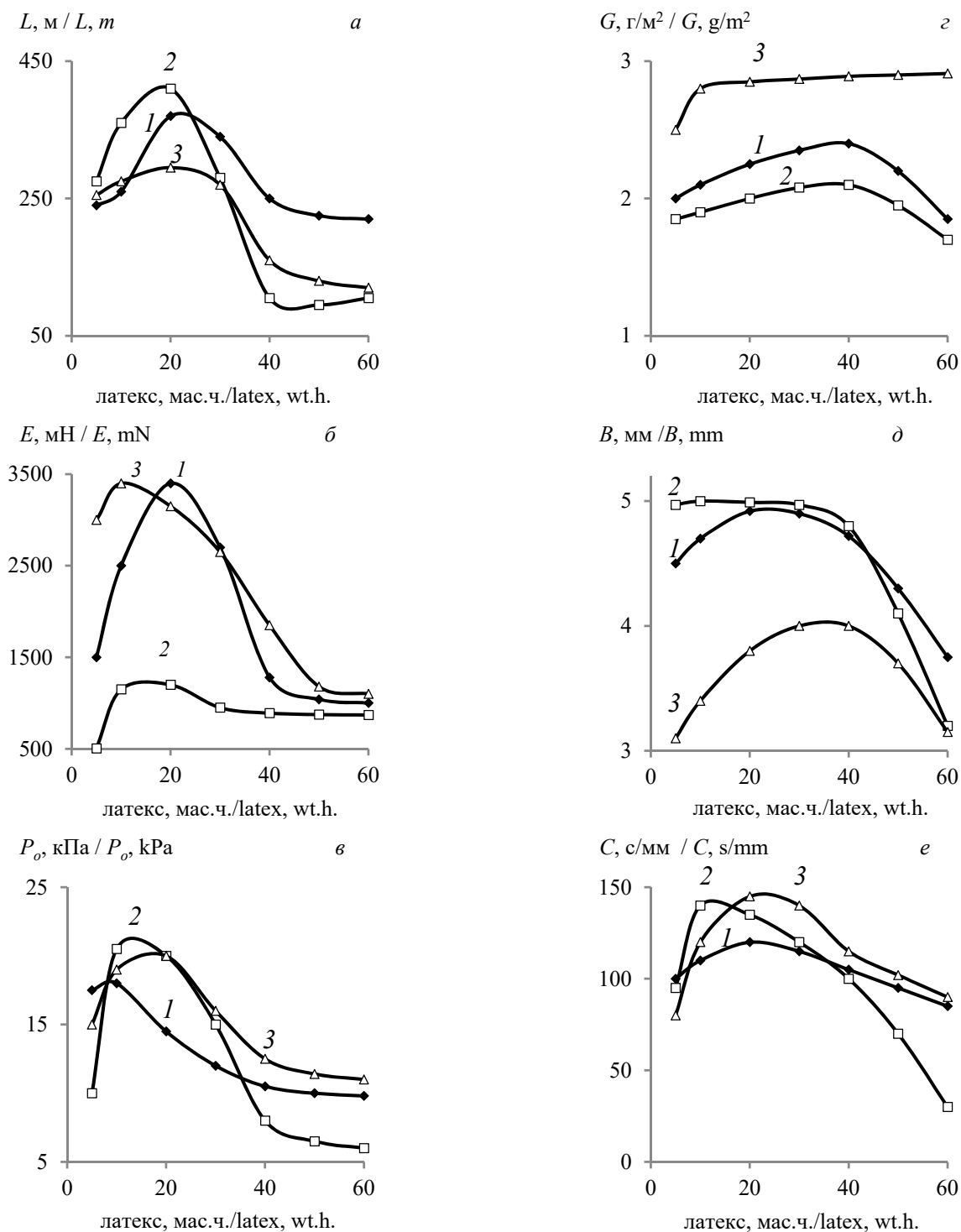


Рисунок 2. Зависимость физико-механических показателей картона от содержания латекса ВХВД-65 и сульфата алюминия, мас.ч.: 3,0 (1); 6,0 (2); 10,0 (3)

Figure 2. Dependence of physical and mechanical parameters of cardboard on the content of latex VHVD-65 and aluminum sulfate, wt.h.: 3,0 (1); 6,0 (2); 10,0 (3).

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

Значения  $E_{max}$ , характеризующие, в основном, эластичные свойства материала, для образцов с ВХВД-65 на 35–38 % выше, чем для асбокартона с ДВХБ-70 (рис. 1б, 2б).

Максимальные значения сопротивления продавливанию  $P_o$  при содержании 10/(10–20) мас.ч. ДВХБ-70/ВХВД-65 равняются  $P_{o(max)} = (14–15)/20$  кПа. Как и с предыдущим показателем ( $E$ ), сопротивление продавливанию выше на 25–30 % для изделий с ВХВД-65, по сравнению с ДВХБ-70. При высоком содержании коагулянта (10 мас.ч.) латекс ДВХБ-70 количественно осаждается на минеральных волокнах, демонстрируя высокие показатели  $P_o = 13–14$  кПа (рис. 1в, 2в).

Для образцов с ВХВД-65 обнаружена высокая влагоемкость асбокартона согласно впитываемости при одностороннем смачивании ( $G$ ) и капиллярной впитываемости ( $B$ ):  $G_{max}, г/м^2 / B_{max}, мм = (2–3)/(4–5)$  (рис. 2 з, д). Для отливок с ДВХБ-70 значения  $G$  уменьшаются с 1–3 г/м<sup>2</sup> до, практически, нуля при увеличении содержания связующего в исходной массе. Очевидно, что решающую роль в придании высокой гидрофобности материалу придают пленкообразующие свойства латекса ДВХБ-70.

Значения капиллярной впитываемости ( $B$ ) близки к нулю при любых концентрациях ДВХБ-70 (рис. 1 з, д). Высокая влагоемкость асбокартона с ВХВД-65 обусловлена присутствием в составе сополимера значительного количества атомов хлора (67–68 %), подверженных значительной гидратации.

Высокие пленкообразующие свойства ДВХБ-70 определяются природой эмульгатора (олеат аммония), образующего в присутствии коагулянта малорастворимый олеат алюминия, при нейтральной коагуляции связующего в режиме относительно равномерного осаждения на поверхности асбестовых волокон.

Подтверждением являются более высокие значения степени проклейки для образцов с ДВХБ-70 ( $C = 425–435$  с/мм), по сравнению с ВХВД-65 ( $C = 143–161$  с/мм) при содержании в волокнистой суспензии связующих 20 мас.ч. Зависимости величин степени проклейки от содержания связующих ДВХБ-70/ и ВХВД-65 имеют экстремальный характер с наличием максимума при относительно невы-

соком количестве латексов (20–25 мас.ч.) и коагулянта (3–6 мас.ч.) в волокнистой массе. Очевидно, решающим фактором остается комфортный режим осаждения латексов на минеральные волокна в процессе проклейки.

Для визуализации опытных данных построена гистограмма (рис. 3), показывающая частоту появления измеренных значений разрывной длины ( $L$ , м) образцов асбестового картона, полученных при отливке волокнистой суспензии состава, мас.ч.:100 хризотил-асбест марки М-4-20; 20,0 латекс ДВХБ-70; 6,0 сульфат алюминия. Высота каждого столбца указывает на частоту появления значений параметра в выбранном диапазоне, а количество столбцов – на число выбранных диапазонов. Гистограмма позволяет наглядно представить тенденции изменения измеряемых параметров и зрительно оценить закон их распределения, быстро определить центр, разброс и форму распределения случайной величины. На оси абсцисс гистограммы отмечаются интервалы, а на оси ординат – частота попаданий результатов измерений в каждый интервал.

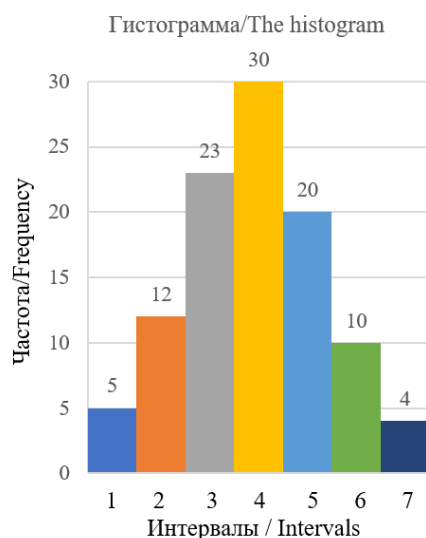


Рисунок 3. Частота появления измеренных значений разрывной длины ( $L$ , м) образцов асбестового картона, полученных при отливке волокнистой суспензии

Figure 3. The frequency of occurrence of measured values of the breaking length ( $L$ , m) of asbestos cardboard samples obtained by casting a fibrous suspension

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

Установлены следующие границы семи интервалов: 1 – 269–271; 2 – 272–274; 3 – 275–277; 4 – 278–282; 5 – 283–285; 6 – 286–288; 7 – 289–291.

Представленная гистограмма имеет форму нормального распределения по результатам 104 выполненных измерений, что говорит о стабильности процесса. Таким образом, разрывная длина асбестового картона исследованной системы равняется  $L = 280$  м (см. рис. 1а, кривая 2).

### Обсуждение

Поскольку в научной периодике за последние 5 лет не обнаружено работ, непосредственно связанных с получением и изучением свойств асбестового картона, выявленные результаты можно опосредовано сопоставить с данными В.К. Дубовый и др. [15,16,44], которые исследуют материалы, изготовленные на основе стекловолокна и предназначенные для фильтрации воздуха. Стекланные волокна имеют целый комплекс уникальных свойств: термо-, хемо- и биостойкость, высокие удельную поверхность, фильтрующую способность и прочность, устойчивость к действию агрессивных сред. В отличие от волокон растительного происхождения стекланные волокна не способны к фибриллированию, набуханию и связеобразованию, вследствие чего также, как и асбестовые волокна, нуждаются в применении связующего в исходной композиции при изготовлении фильтровального материала. Использование неорганических связующих обеспечивает устойчивость фильтровальных материалов при высоких температурах (до 700 °С). Органические связующие в зависимости от химического состава дают возможность фильтровать воздушные среды при нормальных температурах. В качестве органических связующих были выбраны поливинилацетатная дисперсия и мелкодиспергированный водный раствор полиэтилена, обладающие хорошей адгезией к стекланным волокнам. Водные дисперсии этих компонентов позволяют применять их по бумажной технологии. Также в качестве органического связующего используют волокна растительного сырья, в качестве которого взята термомеханическая масса (ТММ), неорганического связующего – сульфат алюминия. Полиядерные комплексы алюминия обладают высокой связеобразующей способностью по

отношению к стекланным волокнам и достаточно хорошими сорбционными характеристиками.

При использовании в качестве связующего дисперсии поливинилацетата (ПВА) прочность достигает максимальных значений при расходе 10 % ПВА: 460–730 кПа. Для максимальных значений прочности при расходе связующего 10 % была исследована капиллярная впитываемость образцов стекловолоконистой бумаги  $B = 84–135$  мм. Отсюда, стекловолокно в составе готового материала придает последнему существенную прочность по сравнению с асбестовыми волокнами, но резко снижает водоотталкивающие свойства, исключая возможность использования его на открытом воздухе.

К трудностям, возникшим на протяжении работы, следует отнести проклейку композиций исходного материала с высоким содержанием связующего и коагулянта, а именно, значительное комкование волоконистой массы при добавлении сульфата алюминия, что затрудняет получение отливок с одинаковой толщиной по всей площади образца.

Оценивая полученные результаты, можно констатировать, что физико-механические показатели асбестового картона определяются не только природой и количеством связующего, но и благоприятным режимом проклейки, обеспечивающем равномерное распределение исходных компонентов по всему объему получаемой отливки, что было также отмечено и при изготовлении фильтрующего материала на основе стекловолокна.

Для изучения данной темы в дальнейших исследованиях необходимо рекомендовать поиск альтернативных коагулянтов, которые могли бы обеспечить не только количественную коагуляцию латексов на асбестовых волокнах, но и «спокойный» кинетический режим осаждения связующего для получения однородного готового материала.

Практическое и теоретическое использование результатов эксперимента заключается в наработке навыков получения асбестового картона с воспроизводимыми физико-механическими показателями на основе теоретических представлений коллоидной химии: гидрофильно-олеофильного взаимодействия органических латексных частиц с минеральными волокнами хризотил-асбеста в условиях максимальной

агрегативной устойчивости и гетерокоагуляции связующего при получении однородной волокнистой суспензии и проклейки волокон, соответственно.

Слабым моментом разрабатываемой технологии является возможная неоднородность минерального сырья – хризотил-асбеста, добываемого карьерным способом.

Ограничения, с которыми столкнулись в ходе работы, относятся к оптимизации удельного расхода реагентов исходной композиции, определяющего себестоимость получения готового материала и требуемые физико-механические показатели асбестового картона.

План будущих исследований включает опробование других типов латексов (в частности, промышленных синтетических) и коагулянтов с целью получения асбестового картона с требуемыми потребительскими свойствами.

Ученым, проводящим исследования в данной области, рекомендуется расширять ассортимент изготавливаемых бумагоподобных материалов на основе минеральных волокон хризотил-асбеста.

### Заключение

Бумагоподобные материалы с применением синтетических латексов характеризуются рядом преимуществ: высокими технологическими и эксплуатационными свойствами, относительно невысокой стоимостью и доступностью, безопасностью для здоровья работающих и окружающей среды, легкой смываемостью и возможностью регулирования показателей в широком их диапазоне. Обычно использование латексов в составе наполненных композиций ограничивает их низкая устойчивость при совмещении с минеральными наполнителями, поэтому используются специально разработанные латексы, преимущественно сополимеры бутадиена со стиролом, которые получают в две стадии с дополнительным концентрированием.

Максимальные прочностные свойства образцов асбокартона на основе сорта М-4-20 выявлены при невысоком содержании латексов и коагулянта, мас.ч.: 5,0 ДВХБ-70; 20,0 ВХВД-65; 3–6  $Al_2(SO_4)_3$ , а именно ДВХБ-70/ВХВД-65, м:  $L_{max} = (504–662)/(384–417)$ . При увеличении количества ДВХБ-70/ВХВД-65 до (20–40)/(40–60) мас.ч. и сульфата алюминия до 10 мас.ч. значения разрывной длины

образцов снижаются:  $L_{min} = 206/(132–168)$ , что связано с изменением режима осаждения связующего. Статистическая обработка результатов испытаний отливок асбестового картона, выполненная с использованием программного пакета «Statistica», показала, что исследованные характеристики материала определены с доверительной вероятностью  $p = 0,95$  и уровнем значимости  $\alpha = 0,05$ .

Для образцов с ВХВД-65 обнаружена высокая влагоемкость асбокартона. Для отливок с ДВХБ-70 значения впитываемости при одностороннем смачивании ( $G$ ) уменьшаются с 1–3 г/м<sup>2</sup> до, практически, нуля при увеличении содержания связующего в исходной массе. Значения капиллярной впитываемости ( $B$ ) близки к нулю при любых исследованных концентрациях ДВХБ-70. Указанное свойство обусловлено высокой пленкообразующей способностью латекса, благодаря природе эмульгатора (олеат аммония), образующего в присутствии коагулянта малорастворимый олеат алюминия при нейтрализационной коагуляции связующего с относительно равномерным осаждением последнего на поверхности асбестовых волокон.

Таким образом, по совокупности прочностных и гидрофобных свойств для получения бумагоподобного материала на основе минеральных волокон хризотил-асбеста (100 мас.ч.) рекомендуется латекс ДВХБ-70 (10–20 мас.ч.) и коагулянт  $Al_2(SO_4)_3$  (3–6 мас.ч.).

### Список литературы

1. Вьюнков С. Н. Влияние карбамида на отверждение карбамидоформальдегидных смол. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2019; 226: 155–161. DOI: 10.21266/2079-4304.2019.226.155-161. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37233749>.
2. Вьюнков С. Н., Васильев В. В. Модификация отвердителя карбамидоформальдегидных смол с низким мольным соотношением формальдегида к карбамиду. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023; 243: 284–296. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.243.284-296. Режим доступа <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53976464>.
3. Федотов А. А., Вахнина Т. Н., Титунин А. А., Свиридов А. В. Исследование влияния стабилизаторов на свойства карбамидоформальдегидного связующего и фанеры ФК. Лесотехнический журнал. 2020; 10 (1): 136–144. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.1/14. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42853667>.
4. Леонович А. А., Свиридов Е. А., Глазунова М. Г. Поисковые исследования в создании моноструктурных древесноволокнистых плит пониженной горючести. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020; 232: 233–243. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.232.233-243. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44256696>.
5. Вахнина Т. Н., Федотов А. А., Титунин А. А., Сусоева И. В. Влияние модификаторов на время отверждения фенолоформальдегидного связующего для прессования фанеры при низкотемпературном режиме. Лесотехнический журнал. 2019; 9(4) (36): 99–108. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.4/11. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41748527>.
6. Федотов А. А., Вахнина Т. Н., Котиков С. А. Повышение прочностных показателей фанеры ФСФ путем использования модифицирующих добавок к связующему. Лесотехнический журнал. 2020; 10(1) (37): 124–135. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.1/13. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42853666>.
7. Федотов А. А., Вахнина Т. Н., Котиков С. А. Влияние факторов процесса производства на показатели фанеры на модифицированном фенолоформальдегидном связующем. Лесотехнический журнал. 2021; 11(1) (41): 88–100. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.1/8. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44938468>.
8. Никулина Н. С., Дмитренко А. И., Томина Е. В., Никулин С. С., Жужукин К. В. Разработка модифицирующих составов древесины на основе побочных продуктов производства полибутадиена и метилметакрилата. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023; 245: 318–330. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.318-330. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54768963>.
9. Дмитренко А. И., Никулин С. С., Никулина Н. С., Боровской А. М., Недзельская Е. А. Исследование процесса пропитки древесины березы отработанным растительным маслом. Лесотехнический журнал. 2020; 10 (2) (38): 161–168. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.2/16. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43171823>.
10. Томина Е. В., Дмитренко А. И., Жужукин К. В., Ходосова Н. А., Мозговой Н. В. Повышение водостойкости древесины пропиточным составом на основе растительного масла с диоксидом кремния. Лесотехнический журнал. 2022; 12(2) (46): 68–79. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/6>. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49049979>.
11. Артёмов А. В., Вураско А. В., Ершова А. С., Бурындин В. Г. Влияние содержания гидролизного лигнина на показатели отделочного материала на основе пластика без связующего. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023; 245: 293–307. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.293-307. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54768961>.
12. Лоренцон А. В., Геворкянц Т. Д., Морева Ю. Л., Чернобережский Ю. М. Температурная зависимость коагуляционного действия  $Al_2(SO_4)_3$  на водную дисперсию сульфатного лигнина. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023.; 245: 308–317. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.308-317. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54768962>.

13. Дягилева А. Б., Смирнова А. И. Сравнительное исследование термостабильности древесины, обработанной золь-гель композицией на основе лигнина. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022; 239: 236–247. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.239.236-247. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49178598>.
14. Бельчинская Л. И., Жужукин К. В., Новикова Л. А. Влияние ультразвукового диспергирования пропиточного состава древесины на её гидрофобизацию. Лесотехнический журнал. 2019; 9(2) (34): 126–136. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.2/14. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38472864>.
15. Дубовый В. К., Криницин Н. А. Влияние содержания и вида связующего на прочность бумаги из стеклянных волокон. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020; 232: 244–251. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.232.244-251. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44256697>.
16. Дубовый В. К., Суслов Г. А. Исследование прочности сорбционных композиционных материалов на основе микротонких стеклянных волокон. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020; 233: 221–227. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.233.221-227. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44489959>.
17. Bagchi S.K., Patnaik R., Rawat I. Beneficiation of paper-pulp industrial wastewater for improved outdoor biomass cultivation and biodiesel production using *Tetradesmus obliquus* (Turpin) Kützing. Renewable Energy. 2024; 222. 119848. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119848>.
18. Sharma D., Sahu S., Singh G. An eco-friendly process for xylose production from waste of pulp and paper industry with xylanase catalyst. Sustainable Chemistry for the Environment. 2023; 3. 100024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2023.100024>.
19. Steephen A., Preethi V., Annenewmy B. Solar photocatalytic hydrogen production from pulp and paper wastewater. International Journal of Hydrogen Energy. 2024; 52(A):1393–1404. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.381>.
20. Romani A., Del-Rio P.G., Rubira A. Co-valorization of discarded wood pinchips and sludge from the pulp and paper industry for production of advanced biofuels. Industrial Crops and Products. 2024; 209. 117992. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117992>.
21. Yang M., Li J., Wang S. Status and trends of enzyme cocktails for efficient and ecological production in the pulp and paper industry. Journal of Cleaner Production. 2023; 418. 138196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138196>.
22. Axelrod L., Charron P., Tahir I. The effect of pulp production times on the characteristics and properties of hemp-based paper. Materials Today Communications. 2023; 34. 104976. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104976>.
23. Taylor N.M., Pilkington G.A., Snow T., Dowding P.J. Surface forces and friction between Langmuir-Blodgett polymer layers in a nonpolar solvent. Journal of Colloid and Interface Science. 2024; 653(B):1432–1443. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.09.146>.
24. Elovenko D., Kräusel V. The study of thermal conductivity of asbestos cardboard and fire clay powder to assess the possibility of their application in prefabricated structures of cylindrical housings of pressure vessels. Materials Today: Proceedings. 2019; 19(5): 2389–2395. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.041>.
25. Fitzgerald S.M. Resolving asbestos and ultrafine particulate definitions with carcinogenicity. Lung Cancer. 2024; 189. 107478. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lungcan.2024.107478>.
26. Obmiński A. Asbestos in building and its destruction. Construction and Building Materials. 2020; 249. 118685. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118685>.
27. Akyzbekov Y., Shevko V., Karatayeva G. Thermodynamic prediction of the possibility of comprehensive processing chrysotile-asbestos waste. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. 2023; 8. 100488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100488>.



28. Avataneo C., Petriglieri J.R., Capella S. Chrysotile asbestos migration in air from contaminated water: An experimental simulation. *Journal of Hazardous Materials*. 2022; 424(C). 127528. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127528>.
29. Tan Y., Zou Z., Qu J. Mechanochemical conversion of chrysotile asbestos tailing into struvite for full elements utilization as citric-acid soluble fertilizer. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 283. 124637. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124637>.
30. Castoldi R.S., Liebscher M., Souza L.M.S. Effect of polymeric fiber coating on the mechanical performance, water absorption, and interfacial bond with cement-based matrices. *Construction and Building Materials*. 2023; 404. 133222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133222>.
31. Bakatovich A., Gaspar F., Boltrushevich N. Thermal insulation material based on reed and straw fibres bonded with sodium silicate and rosin. *Construction and Building Materials*. 2022; 352. 129055. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129055>.
32. Geng Y., Nie Y., Du H. Coagulation performance and floc characteristics of Fe–Ti–V ternary inorganic coagulant for organic wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*. 2023; 56. 104344. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104344>.
33. Yi J., Chen Z., Xu D. Preparation of a coagulant of polysilicate aluminum ferric from foundry dust and its coagulation performance in treatment of swine wastewater. *Journal of Cleaner Production*. 2024; 434. 140400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140400>.
34. Zeng H., Tang H., Sun W. Deep dewatering of bauxite residue via the synergy of surfactant, coagulant, and flocculant: Effect of surfactants on dewatering and settling properties. *Separation and Purification Technology*. 2022. 302. 122110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122110>.
35. Chen J., Li X., Cai W. High-efficiency extraction of aluminum from low-grade kaolin via a novel low-temperature activation method for the preparation of poly-aluminum-ferric-sulfate coagulant. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 257. 120399. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120399>.
36. Karyab H., Ghasemi M., Ghotbinia F. Efficiency of chitosan nanoparticle with polyaluminum chloride in dye removal from aqueous solutions: Optimization through response surface methodology (RSM) and central composite design (CCD). *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023; 249. 125977. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125977>.
37. Milbrandt A., Zuboy J., Coney K. Paper and cardboard waste in the United States: Geographic, market, and energy assessment. *Waste Management Bulletin*. 2024; 2(1): 21–28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2023.12.002>.
38. Kuffel A., Daeid N.N., Gray A. Comparison of swabbing and cutting-out DNA collection methods from cotton, paper, and cardboard surfaces. *Forensic Science International: Synergy*. 2024; 8. 100453. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fsisyn.2023.100453>.
39. Mazaherifar M.H., Coşoreanu C., Timar C.M. Physical and mechanical properties of foam-type panels manufactured from recycled cardboard. *Construction and Building Materials*. 2024; 411. 134685. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134685>.
40. Mahdi S., Xie T., Venkatesan S., Gravina R.J. Mechanical characterisation and small-scale life-cycle assessment of polypropylene macro-fibre blended recycled cardboard concrete. *Construction and Building Materials*. 2023; 409. 133902. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133902>.
41. Strozzi M., Smirnov V.V., Pellicano F. Nonlocal anisotropic elastic shell model for vibrations of double-walled carbon nanotubes under nonlinear van der Waals interaction forces. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2022; 146. 104172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2022.104172>.
42. Chen K., Wu J., Yarin A.L. Electrospun membranes filtering 100 nm particles from air flow by means of the van der Waals and Coulomb forces. *Journal of Membrane Science*. 2022; 644. 120138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.120138>.

43. Zhang J., Wang C., Zhao H. Dynamic surfaces of latex films and their antifouling applications. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2024; 654(B):1281–1292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.10.138>.

44. Криницин Н. А., Дубовый В. К., Полякова К. В., Ковернинский И. Н. Исследование влияния вида связующего на свойства фильтровальных стекловолоконистых бумаг для очистки воздуха. *Изв. вузов. Лесн. журн.* 2022; 2: 178–192. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-178-192. Код доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48211760>.

### References

1. Vyunkov S. N. Vliyanie karbamida na otverzhdenie karbamidofomal' degidny'x smol. [The effect of urea on the curing of urea-formaldehyde resins]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotexnicheskoj akademii*. 2019; (226): 155–161. (In Russ.). DOI: 10.21266/2079-4304.2019.226.155-161. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37233749>.

2. Vyunkov S. N., Vasiliev V. V. Modifikaciya otverditelya karbamidofomal' degidny'x smol s nizkim mol'ny'm sootnosheniem formal' degida k karbamidu. [Modification of the hardener of urea-formaldehyde resins with a low molar ratio of formaldehyde to urea]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotexnicheskoj akademii*. 2023; (243): 284–296. (In Russ.). DOI: 10.21266/2079-4304.2023.243.284-296. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53976464>.

3. Fedotov A. A., Vakhnina T. N., Titunin A. A., Sviridov A. V. Issledovanie vliyaniya stabilizatorov na svoystva karbamidofomal' degidnogo svyazuyushhego i fanery' FK. [Investigation of the effect of stabilizers on the properties of urea-formaldehyde binder and FC plywood]. *Lesotexnicheskij zhurnal*. 2020; 10(1) (37): 136–144. (In Russ.). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.1/14. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42853667>.

4. Leonovich A. A., Sviridov E. A., Glazunova M. G. Poiskovy'e issledovaniya v sozdanii monostrukturny'x drevesnovoloknisty'x plit ponizhennoj goryuchesti. [Exploratory research in the creation of monostructured fiberboard of reduced flammability]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotexnicheskoj akademii*. 2020; (232): 233–243. (In Russ.). DOI: 10.21266/2079-4304.2020.232.233-243. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44256696>.

5. Vakhnina T. N., Fedotov A. A., Titunin A. A., Syssoeva I. V. Vliyanie modifikatorov na vremya otverzhdeniya fenoloformal' degidnogo svyazuyushhego dlya pressovaniya fanery' pri nizkotemperaturnom rezhime. [Effect of modifiers on the curing time of phenol-formaldehyde binder for pressing plywood at low temperature]. *Lesotexnicheskij zhurnal*. 2019; 9(4) (36): 99–108. (In Russ.). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.4/11. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41748527>.

6. Fedotov A. A., Vakhnina T. N., Kotikov S. A. Povy'shenie prochnostny'x pokazatelej fanery' FSF putem ispol'zovaniya modifiziruyushhix dobavok k svyazuyushhemu. [Increasing the strength parameters of FSF plywood by using modifying additives to the binder]. *Lesotexnicheskij zhurnal*. 2020; 10(1) (37): 124–135. (In Russ.). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.1/13. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42853666>.

7. Fedotov A. A., Vakhnina T. N., Kotikov S. A. Vliyanie faktorov processa proizvodstva na pokazateli fanery' na modifitsirovannom fenoloformal' degidnom svyazuyushhem. [Influence of production process factors on plywood performance on modified phenol-formaldehyde binder]. *Lesotexnicheskij zhurnal*. 2021; 11(1) (41): 88–100. (In Russ.). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.1/8. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44938468>.

8. Nikulina N. S., Dmitrenkov A. I., Tomina E. V., Nikulin S. S., Zhuzhukin K. V. Razrabotka modifiziruyushhix sostavov drevesiny' na osnove pobochny'x produktov proizvodstva polibutadiena i metilmetakrilata [Development of modifying wood compositions based on by-products of polybutadiene and methyl methacrylate production]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotexnicheskoj akademii*. 2023; (245): 318–330. (In Russ.). DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.318-330. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54768963>.

9. Dmitrenkov A. I., Nikulin S. S., Nikulina N. S., Borovskoi A. M., Nedzelskaya E. A. Issledovanie processa propitki drevesiny' berezy' otrabotanny'm rastitel'ny'm maslom. [Investigation of the process of impregnation of birch wood with used vegetable oil]. *Lesotexnicheskij zhurnal*. 2020; 10 (2) (38): 161–168. (In Russ.). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.2/16. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43171823>.

10. Tomina E. V., Dmitrienkov A. I., Zhuzhukin K. V., Khodosova N. A., Mozgovoy N. V. Povy'shenie vodostojkosti drevesiny' propitochny'm sostavom na osnove rastitel'nogo masla s dioksidom kremniya. [Increasing the water resistance of wood with an impregnating composition based on vegetable oil with silicon dioxide]. *Lesotexnicheskij*

zhurnal. 2022; 12(2) (46): 68–79. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/6>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49049979>.

11. Artyomov A. V., Vurasko A. V., Ershova A. S., Buryndin V. G. Vliyanie sodержaniya gidroliznogo lignina na pokazateli otdelochnogo materiala na osnove plastika bez svyazuyushhego. [The effect of hydrolysis lignin content on the performance of plastic-based finishing material without binder]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotexnicheskoj akademii*. 2023; 245: 293–307. (In Russ.). DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.293-307. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54768961>.

12. Lorentzson A. V., Gevorkyants T. D., Moreva Y. L., Chernoberezhsky Y. M. Temperaturnaya zavisimost' koagulyacionnogo dejstviya  $Al_2(SO_4)_3$  na vodnyu dispersiyu sul'fatnogo lignina. [Temperature dependence of coagulation action of  $Al_2(SO_4)_3$  on the aqueous dispersion of sulfate lignin]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotexnicheskoj akademii*. 2023; (245): 308–317. (In Russ.). DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.308-317. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54768962>.

13. Diaghileva A. B., Smirnova A. I. Sravnitel'noe issledovanie termostabil'nosti drevesiny', obrabotannoj zol'-gel' kompoziciej na osnove lignina. [Comparative study of the thermal stability of wood treated with a sol-gel composition based on lignin]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotexnicheskoj akademii*. 2022; (239): 236–247. (In Russ.). DOI: 10.21266/2079-4304.2022.239.236-247. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49178598>.

14. Belchinskaya L. I., Zhuzhukin K. V., Novikova L. A. Vliyanie ul'trazvukovogo dispergirovaniya propitochnogo sostava drevesiny' na eyo gidrofobizaciyu. [The effect of ultrasonic dispersion of the impregnating composition of wood on its hydrophobization]. *Lesotexnicheskij zhurnal*. 2019; 9(2) (34): 126–136. (In Russ.). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.2/14. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38472864>.

15. Dubovy V. K., Krinitsyn N. A. Vliyanie sodержaniya i vida svyazuyushhego na prochnost' bumagi iz steklyanny'x volokon. [Influence of the content and type of binder on the strength of glass fiber paper]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotexnicheskoj akademii*. 2020; (232): 244–251. (In Russ.). DOI: 10.21266/2079-4304.2020.232.244-251. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44256697>.

16. Dubovy V. K., Suslov G. A. Issledovanie prochnosti sorbcionny'x kompozicionny'x materialov na osnove mikrotonkix steklyanny'x volokon. [Strength study of sorption composite materials based on microfine glass fibers]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotexnicheskoj akademii*. 2020; (233): 221–227. (In Russ.). DOI: 10.21266/2079-4304.2020.233.221-227. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44489959>.

17. Bagchi S.K., Patnaik R., Rawat I. Beneficiation of paper-pulp industrial wastewater for improved outdoor biomass cultivation and biodiesel production using *Tetrademus obliquus* (Turpin) Kützing. *Renewable Energy*. 2024; 222: 119848. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119848>.

18. Sharma D., Sahu S., Singh G. An eco-friendly process for xylose production from waste of pulp and paper industry with xylanase catalyst. *Sustainable Chemistry for the Environment*. 2023; 3: 100024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2023.100024>.

19. Steephen A., Preethi V., Annenewmy B. Solar photocatalytic hydrogen production from pulp and paper wastewater. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024; 52(A):1393–1404. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.381>.

20. Romani A., Del-Río P.G., Rubira A. Co-valorization of discarded wood pinchips and sludge from the pulp and paper industry for production of advanced biofuels. *Industrial Crops and Products*. 2024; 209: 117992. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117992>.

21. Yang M., Li J., Wang S. Status and trends of enzyme cocktails for efficient and ecological production in the pulp and paper industry. *Journal of Cleaner Production*. 2023; 418: 138196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138196>.

22. Axelrod L., Charron P., Tahir I. The effect of pulp production times on the characteristics and properties of hemp-based paper. *Materials Today Communications*. 2023; 34: 104976. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104976>.

23. Taylor N.M., Pilkington G.A., Snow T., Dowding P.J. Surface forces and friction between Langmuir-Blodgett polymer layers in a nonpolar solvent. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2024; 653(B):1432–1443. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.09.146>.
24. Elovenko D., Kräusel V. The study of thermal conductivity of asbestos cardboard and fire clay powder to assess the possibility of their application in prefabricated structures of cylindrical housings of pressure vessels. *Materials Today: Proceedings*. 2019; 19(5): 2389–2395. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.041>.
25. Fitzgerald S.M. Resolving asbestos and ultrafine particulate definitions with carcinogenicity. *Lung Cancer*. 2024; 189. 107478. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lungcan.2024.107478>.
26. Obmiński A. Asbestos in building and its destruction. *Construction and Building Materials*. 2020; 249. 118685. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118685>
27. Akyzbekov Y., Shevko V., Karatayeva G. Thermodynamic prediction of the possibility of comprehensive processing chrysotile-asbestos waste. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2023; 8. 100488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100488>.
28. Avataneo C., Petriglieri J.R., Capella S. Chrysotile asbestos migration in air from contaminated water: An experimental simulation. *Journal of Hazardous Materials*. 2022; 424(C). 127528. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127528>.
29. Tan Y., Zou Z., Qu J. Mechanochemical conversion of chrysotile asbestos tailing into struvite for full elements utilization as citric-acid soluble fertilizer. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 283. 124637. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124637>.
30. Castoldi R.S., Liebscher M., Souza L.M.S. Effect of polymeric fiber coating on the mechanical performance, water absorption, and interfacial bond with cement-based matrices. *Construction and Building Materials*. 2023; 404. 133222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133222>.
31. Bakatovich A., Gaspar F., Boltrushevich N. Thermal insulation material based on reed and straw fibres bonded with sodium silicate and rosin. *Construction and Building Materials*. 2022; 352. 129055. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129055>.
32. Geng Y., Nie Y., Du H. Coagulation performance and floc characteristics of Fe–Ti–V ternary inorganic coagulant for organic wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*. 2023; 56. 104344. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104344>.
33. Yi J., Chen Z., Xu D. Preparation of a coagulant of polysilicate aluminum ferric from foundry dust and its coagulation performance in treatment of swine wastewater. *Journal of Cleaner Production*. 2024; 434. 140400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140400>.
34. Zeng H., Tang H., Sun W. Deep dewatering of bauxite residue via the synergy of surfactant, coagulant, and flocculant: Effect of surfactants on dewatering and settling properties. *Separation and Purification Technology*. 2022. 302. 122110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122110>.
35. Chen J., Li X., Cai W. High-efficiency extraction of aluminum from low-grade kaolin via a novel low-temperature activation method for the preparation of poly-aluminum-ferric-sulfate coagulant. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 257. 120399. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120399>.
36. Karyab H., Ghasemi M., Ghotbinia F. Efficiency of chitosan nanoparticle with polyaluminum chloride in dye removal from aqueous solutions: Optimization through response surface methodology (RSM) and central composite design (CCD). *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023; 249. 125977. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125977>.
37. Milbrandt A., Zuboy J., Coney K. Paper and cardboard waste in the United States: Geographic, market, and energy assessment. *Waste Management Bulletin*. 2024; 2(1): 21–28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2023.12.002>.
38. Kuffel A., Daeid N.N., Gray A. Comparison of swabbing and cutting-out DNA collection methods from cotton, paper, and cardboard surfaces. *Forensic Science International: Synergy*. 2024; 8. 100453. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fsisyn.2023.100453>.

39. Mazaherifar M.H., Coşoreanu C., Timar C.M. Physical and mechanical properties of foam-type panels manufactured from recycled cardboard. *Construction and Building Materials*. 2024; 411. 134685 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134685>

40. Mahdi S., Xie T., Venkatesan S., Gravina R.J. Mechanical characterisation and small-scale life-cycle assessment of polypropylene macro-fibre blended recycled cardboard concrete. *Construction and Building Materials*. 2023; 409. 133902. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133902>.

41. Strozzi M., Smirnov V.V., Pellicano F. Nonlocal anisotropic elastic shell model for vibrations of double-walled carbon nanotubes under nonlinear van der Waals interaction forces. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2022; 146. 104172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2022.104172>.

42. Chen K., Wu J., Yarin A.L. Electrospun membranes filtering 100 nm particles from air flow by means of the van der Waals and Coulomb forces. *Journal of Membrane Science*. 2022; 644.120138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.120138>.

43. Zhang J., Wang C., Zhao H. Dynamic surfaces of latex films and their antifouling applications. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2024; 654(B):1281–1292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.10.138>.

44. Krinitsyn N. A., Dubovy V. K., Polyakova K. V., Koverninsky I. N. Issledovanie vliyaniya vida svyazuuyushhego na svoystva fil'troval'ny`x steklovoloknisty`x bumag dlya ochistki vozduxa [Investigation of the effect of the type of binder on the properties of filter fiberglass papers for air purification]. *Izv. vuzov. Lesn. zhurn.* 2022; (2): 178–192. (In Russ.). DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-178-192. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48211760>.

### Сведения об авторах

✉ *Мальцев Геннадий Иванович* – доктор техн. наук, проф. кафедры «Химическая технология древесины, биотехнология и наноматериалы», ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», ул. Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620100, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0750-0070>, e-mail: [maltsewg@yandex.ru](mailto:maltsewg@yandex.ru).

*Юрьев Юрий Леонидович* – доктор техн. наук, зав. кафедрой «Химическая технология древесины, биотехнология и наноматериалы», ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», ул. Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620100, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1187-7401>, e-mail: [charekat@mail.ru](mailto:charekat@mail.ru).

### Information about the authors

✉ *Gennady I. Maltsev* – Dr. Sci. (Techn.), Professor of the Department "Chemical technology of wood, biotechnology and nanomaterials", Siberian tract, 37, Yekaterinburg, Russian Federation, 620100, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0750-0070>, e-mail: [maltsewg@yandex.ru](mailto:maltsewg@yandex.ru).

*Yuri L. Yuryev* – Dr. Sci. (Techn.), Head of the Department "Chemical technology of wood, biotechnology and nanomaterials", Siberian tract, 37, Yekaterinburg, Russian Federation, 620100, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1187-7401>, e-mail: [charekat@mail.ru](mailto:charekat@mail.ru).

✉ – Для контактов | Corresponding author


Оригинальная статья


DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/10>

УДК 630 : 691.11



## Исследование прочности и деформативности клееных деревянных балок с ламелями из термически поврежденной древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на основе планирования эксперимента

Владислав А. Мартынов, [martinov3369@gmail.com](mailto:martinov3369@gmail.com)  <https://orcid.org/0000-0002-6570-0265>

Даниил О. Мясников, [daniil.miasnikov.96@mail.ru](mailto:daniil.miasnikov.96@mail.ru)  <https://orcid.org/0009-0000-3999-7563>

Светлана И. Рощина , [rsi3@mail.ru](mailto:rsi3@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0003-0356-1383>

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Институт архитектуры, строительства и энергетики, ул. Горького, 87, г. Владимир, 600000, Российская Федерация

Частично обугленная в результате лесного пожара древесина сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) сохраняет достаточно высокие физико-механические свойства для использования в качестве конструкционного материала. Существует возможность использования такой древесины в средней части сечения клееных деревянных балок. С целью получения максимальных значений прочности и деформативности балочной конструкции сформирован многофакторный эксперимент, позволяющий определить оптимальные варьируемые факторы: место отбора древесины по высоте ствола дерева; соотношение площади поперечного сечения древесины, поврежденной огневом воздействием, к общей площади поперечного сечения клееной балки; толщина применяемых ламелей. Полученное уравнение регрессии  $\Delta Q = 38,7366 - 0,0277N - 0,0389T - 0,1283P - 0,00009NT$  адекватно по критерию Фишера  $F_p = 0,033$  при уровне значимости 5%. Условие  $F_p < F_t$  выполняется. Максимальная несущая способность клееных деревянных балок с ламелями из термически поврежденной древесины *P. sylvestris* достигается при средней плотности сырьевой древесины 471,6 кг/м<sup>3</sup>, отбираемой с комлевой части ствола, и соотношением площади поперечного сечения древесины, поврежденной огневом воздействием, к общей площади поперечного сечения клееной балки в 24% и толщине ламелей в 33 мм. Наибольшее влияние на несущую способность балочных конструкций оказывает соотношение площади поперечного сечения древесины, поврежденной огневом воздействием, к общей площади поперечного сечения клееной балки, затем толщина используемых ламелей, и наименьшее – плотность древесины в зависимости от места отбора древесины по высоте ствола.

**Ключевые слова:** огневое воздействие древесины, деревянные балки, лесные пожары, планирование эксперимента, многофакторный эксперимент, клееные деревянные конструкции (КДК), сосна обыкновенная, *Pinus sylvestris* L.

**Финансирование:** исследование выполнено при отсутствии внешнего финансирования.

**Благодарности:** авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


**Для цитирования:** Мартынов, В. А. Исследование прочности и деформативности клееных деревянных балок с ламелями из термически поврежденной древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на основе планирования эксперимента / В. А. Мартынов, Д. О. Мясников, С. И. Рощина // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 1 (53). – С. 170–189. – Библиогр.: с. 186–189 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/10>.

*Поступила* 29.12.2024. *Пересмотрена* 19.02.2024. *Принята* 02.03.2024. *Опубликована онлайн* 20.03.2024.

### Article

## Investigation of the strength and deformability of glued wooden beams with lamellas made of thermally damaged (*Pinus sylvestris* L.) wood based on experimental planning

Vladislav A. Martinov, martinov3369@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0002-6570-0265>

Daniil O. Myasnikov, daniil.miasnikov.96@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0000-3999-7563>

Svetlana I. Roshchina  rsi3@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-0356-1383>

*Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Institute of Architecture Construction and Energy Engineering, st. Gorky, 87, Vladimir, 600000, Russia*

### Abstract

The wood of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), which has been partially charred due to a forest fire, exhibits sufficiently high physical and mechanical properties to be used as a structural material. This wood can be incorporated into the middle sections of glued wooden beams. In order to optimize the strength and flexibility of the beam structure, we conducted a multifactor experiment to determine the optimum variable factors: 1) the location of wood selection based on the height of the tree trunk; 2) the ratio of the cross-sectional area of fire-damaged wood to the total cross-section area of the glued beam; 3) the thickness of the laminae used based on the results of this experiment. Developed a regression equation:  $\Delta Q = 38.7366 - 0.0277 N - 0.0389 T - 0.1283 P - 0.00009 NT$ , where  $\Delta Q$  is the difference in load-carrying capacity,  $N$  is the number of tests,  $T$  is the thickness of laminae, and  $P$  is the percentage of fire-damaged wood. The resulting equation is deemed adequate based on the Fisher criterion  $F_p = 0.033$  at a 5% significance level. The condition  $F_p < F_t$  is met, indicating that the maximum bearing capacity for glued wooden beams incorporating lamellas from thermally damaged wood is *P. sylvestris* is produced with an average wood density of 471.6 kg/m<sup>3</sup> taken from the bottom of the trunk. The ratio of wood damaged by fire in the cross-section area to the overall cross-sectional area of the glueless beam is 24%, and the lamella thickness is 33 mm. The ratio of wood damaged by fire has the most significant impact on the bearing capacity of the beam structure, followed by lamella thickness, and finally wood density, which depends on the location of wood collection along the trunk height.

**Keywords:** *fire impact of wood, wooden beams, forest fires, experimental planning, multifactorial experiment, glued wood structures (GWS), Scots pine, Pinus sylvestris L.*

**Funding:** this research received no external funding.

**Acknowledgments:** Authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Martinov V. A., Myasnikov D. O., Roshchina S. I. (2024). Investigation of the strength and deformability of glued wooden beams with lamellas made of thermally damaged (*Pinus sylvestris* L.) wood based on experimental planning. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 1 (53), pp. 170-189 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/10>.

*Received* 29.12.2023. *Revised* 19.02.2024. *Accepted* 02.03.2024. *Published online* XX.XX.2024.

### Введение

В России расположены огромные территории лесов, простирающиеся от Западной Европы до Тихоокеанского побережья, что составляет четверть всех мировых запасов древесины (102,2 млрд м<sup>3</sup> по данным Рослесхоза). Главной проблемой сохранения естественных лесных экосистем являются лесные пожары. Ежегодно в России регистрируется от 9 тыс. до 35 тыс. лесных пожаров, охватывающих площади от 500 тыс. до нескольких млн га. [1, 8]. Одним из ключевых аспектов исследований лесов является определение технического качества древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), поврежденной термическим воздействием лесного пожара, и способах ее дальнейшего применения [2-4].

Повреждения деревьев *P. sylvestris* зависят от вида пожара и кардинально отличаются по степени поражения - от довольно незначительного до критического, что вызывает практически полное уничтожение древесины. Деревья, у которых отмечено явно выраженное изменение цвета хвои на рыжий или серый оттенок или осыпание большей части хвои, относятся лесопатологами к категории отмирающих и подлежат удалению из насаждения по требованиям санитарной безопасности [Правила санитарной безопасности в лесах РФ / Утверждены Правительством Российской Федерации 29 июня 2007 г. № 414. – 2007. – 6 с] [5-6]. При наличии таких повреждений, как ожог корневой шейки, подпалы комлевой части ствола, но при этом крона дерева не пострадала в результате пожара, жизнеспособность деревьев по внешним признакам оценить довольно проблематично [7, 10]. Как известно, поврежденное пожаром дерево теряет иммунитет, становясь более уязвимым к воздействию короедов и нашествия паразитов. Увеличивающаяся продолжительность и интенсивность последних сезонов лесных пожаров ежегодно вызывают массовое поражение миллионов деревьев,

способствуя последующей вспышке различных видов подкорковых насекомых, заражающих деревья, не затронутые пожаром [11-13].

В предыдущих исследованиях авторами статьи [1...4] было установлено, что частично обугленная древесина *P. sylvestris* сохраняет достаточно высокие физико-механические свойства, что дает возможность использовать ее как конструкционный материал. В рамках исследования возможности применения древесины, частично поврежденной термическим воздействием лесного пожара, в качестве конструкционного материала авторами предлагается использование такой древесины в средней части сечения клееных деревянных конструкций, что позволит значительно сократить использование высокосортного пиломатериала [9].

Для достижения максимальной эффективности при проведении экспериментальных исследований необходимо моделирование многофакторного эксперимента с учетом экспериментально определенных зависимостей разрушающей нагрузки от различных факторов: место отбора древесины *P. sylvestris* по высоте ствола дерева; соотношение площади поперечного сечения поврежденной огнем воздействием древесины, используемой при изготовлении конструкции, к общей площади поперечного сечения клееной балки; толщина применяемых ламелей, а также определение оптимальных параметров для изготовления деревянных балок с использованием древесины, подвергнутой термическому воздействию.

Цель работы – выполнить планирование натурального эксперимента для определения максимальной несущей способности клееных деревянных конструкций (КДК), выполненных с применением термически поврежденной древесины *P. sylvestris*, с учетом трех различных варьируемых факторов, определенных по результатам испытания крупномасштабных моделей балок.



### Материалы и методы

Эксперимент представляет собой серию действий, которые выполняются над объектом исследования с целью сбора информации о его характеристиках. Важным аспектом обработки полученных данных является построение математической модели изучаемого явления, процесса или объекта. Такая модель может быть использована для анализа процессов и проектирования объектов. Другим аспектом обработки данных, полученных в ходе эксперимента, является задача оптимизации, или, другими словами определение наилучшего сочетания независимых факторов, при котором тот или иной решающий показатель оптимальности принимает максимальное значение.

Опыт представляет собой отдельный этап исследования, при котором проводятся эксперименты для получения данных. План эксперимента – это набор информации, который определяет количество опытов, их условия и последовательность проведения. Планирование эксперимента – это процесс выбора подходящего плана эксперимента, который соответствует поставленным требованиям (от получения априорной информации до получения работоспособной математической модели или определения оптимальных условий). Он включает в себя ряд действий, начиная от получения априорной информации и заканчивая разработкой математической модели или определением оптимальных условий.

Основной целью любого экспериментального исследования является выявление объективных закономерностей, которые отражают взаимосвязи между различными факторами. Эти закономерности имеют важное значение для управления изучаемыми процессами [17-18]. Кроме того, важно представить эту информацию в удобном и компактном виде с количественной оценкой ее точности.

В нашей практической деятельности мы часто сталкиваемся с двумя основными задачами: поиск моделей для изучаемых процессов и определение оптимальных значений параметров и функций, которые мы исследуем. Это особенно сложно, когда мы изучаем сложные явления с множеством факторов, и теоретическое решение становится проблематичным. В таких случаях мы прибегаем к проведению эксперимента с полной обработкой полученных результатов,

и это становится нашим единственным доступным инструментом.

Применение методов математического планирования эксперимента в решении данных задач позволяет достигнуть конечной цели быстро, с минимальными затратами и повышенной точностью, учитывая полное охватывание области определения исследуемой функции. В современных экспериментальных исследованиях математическая теория планирования эксперимента, основанная на теории вероятности и математической статистике, является методологической основой [14].

### *Объект и предмет исследований*

В качестве объекта исследования принята клееная деревянная балка пролетом 6.0 м сечением 140x500(h) мм, средние ламели которой предлагается заменить на термически поврежденную древесину сосны обыкновенной (*P. sylvestris L.*), а крайние ламели, где возникают максимальные растягивающие и сжимающие усилия, изготовить из древесины I сорта. Согласно ГОСТ 20850 «Конструкции деревянные клееные несущие. Общие технические условия», балки пролетом до 7,5 м относятся к классам функционального назначения 2а и 2б, что позволяет использовать при их изготовлении древесину 3-го сорта, к которому, по результатам ранее выполненных испытаний [2-4], можно отнести древесину, поврежденную огнем воздействием до 15 % от площади поперечного сечения ствола.

Предметом исследования является снижение материалоемкости КДК за счет частичного использования низкосортной древесины без снижения несущей способности балок.

### *Дизайн эксперимента*

Исследования на крупномасштабных моделях балок были проведены для получения данных о разрушающей нагрузке, которые могут быть использованы при планировании экспериментов. Авторы статьи провели широкий комплекс исследований физико-механических и прочностных свойств древесины сосны обыкновенной (*P. sylvestris L.*), которая была повреждена огнем в результате лесного пожара. Они также проанализировали механические свойства древесины, сравнивая их характеристики с эталон-

ными образцами, которые не подвергались воздействию пожара. Для этой цели были проведены экспериментальные исследования сжатия вдоль волокон и скалывания вдоль волокон стандартных образцов древесины, подвергнутых термическому повреждению [3-4, 13] стандартных образцов термически поврежденной древесины и древесины I сорта на сжатие вдоль волокон, скалывание вдоль волокон, поперечный изгиб и растяжение в соответствии с ГОСТ 16483.10-73, ГОСТ 16483.5-73\*, ГОСТ 16483.3-84, ГОСТ 16483.23-73, микроскопический анализ термически поврежденной древесины, а также испытания клеевого соединения на стойкость к температурно-влажностным воздействиям. Для комплексного изучения прочностных и физических характеристик древесины сосны, поврежденной термическим воздействием лесного пожара, были отобраны образцы деревьев из трех лесных хозяйств Якутии. Тип пожара: низовой, среднего масштаба. Отбор образцов произведен в течение двух лет, прошедших после пожара. Повреждение древостоя огнем воздействием составляло 10-15 % по поперечному сечению. Из каждого дерева были вырезаны срезы по высоте ствола. Из каждого среза образцы изготавливали по радиусу: в центре, на 0,5 радиуса (середина) и на периферии [14-15].

В ходе этих исследований были учтены факторы, которые остаются постоянными и влияют на результаты, такие как геометрические размеры балочной конструкции и применяемый клеевой состав. Склеивание ламелей крупномасштабных моделей балочных конструкций производилось клеевой системой раздельного нанесения клея и отвердителя ММФ 1255/7555 AkzoNobel Cascomin на основе меламина. Данная ММФ система (меламин, мочевины, формальдегид) является одной из самых широко используемых как в России, так и в Европе. Данная клеевая система отличается очень коротким временем прессования (от 35 минут), высокой экологичностью и безопасностью, хорошей адгезией и проникающей способностью, высокой водо- и атмосферостойкостью, что позволяет применять ее для конструкций, работающих при отрицательных температурах. Следует также отметить, что данная клеевая система обладает конкурентной стоимостью. Для оценки адгезионных свойств было исследовано качество клеевого шва в

образцах поврежденной пожаром древесины, при испытании циклическими температурно-влажностными воздействиями. Испытания клеевого соединения проводились в соответствии с ГОСТ 33121 при помощи климатической камеры КТХВ-1000. Образцы древесины последовательно подвергались замачиванию, замораживанию, оттаиванию и сушке. Механические испытания на скалывание в клеевых соединениях образцов были проведены после 40 циклов температурно-влажностных воздействий. Установлено, что разрушение всех образцов произошло не по клеевому шву, а по волокнам материала [21]. Следовательно, можно сделать вывод о достаточной адгезии термически поврежденной древесины, а также высоком качестве и прочности клеевого соединения [3-4].

В качестве варьируемых факторов приняты:

1. Фактор «ρ», кг/м<sup>3</sup> – плотность древесины в зависимости от места отбора по высоте ствола дерева (комлевая и срединная часть). Плотности и физико-механические характеристики определены по результатам испытания серии стандартных образцов, отобранных из трех срезов по высоте ствола дерева. Результаты испытания образцов из вершинной части ствола показали значительное снижение прочностных характеристик и в планировании эксперимента не учитывались [16-18]. Средняя плотность древесины при нормализованной влажности изменяется от 471,6 кг/м<sup>3</sup> (место отбора – комлевая часть) до 427,5 кг/м<sup>3</sup> (срединная часть).
2. Фактор «Т», % – учитывает соотношение площади поперечного сечения древесины, поврежденной огнем воздействием, к общей площади поперечного сечения клееной балки. Параметр изменяется в пределах от 24 до 64%.
3. Фактор «Р», мм – учитывает толщину применяемых ламелей древесины. Параметр возможных для изготовления ламелей изменяется в пределах от 32 до 50 мм [14].

Необходимо выполнение эксперимента для последовательного изучения особенностей технологии изготовления КДК и выявления влияния различных факторов на прочность и деформативность образцов (табл. 1) [19-20].

Планирование эксперимента — это процесс выбора определенного числа опытов и условий их проведения, который позволяет достичь заданной

точности в решении задачи. Однако, необходимо учитывать, что необходимо минимизировать количество опытов, чтобы сэкономить время и ресурсы. Для этого можно изменять одну или несколько переменных в каждом опыте, которые определяют исследуемое явление. Кроме того, можно использовать математический аппарат для формализации действий при проведении и обработке результатов опытов и пр. После проведения предварительных экспериментов и анализа их результатов, выбор стратегии для последующих действий становится критически важным. Это особенно актуально в задачах оптимизации, где

проводятся небольшие серии экспериментов с использованием заранее разработанного и оптимального алгоритма по определенному критерию. После каждой серии экспериментов проводится анализ полученных данных, который помогает определить дальнейшее направление поиска оптимального решения.

Исходные данные для проведения эксперимента приведены в табл. 2. Усредненные значения разрушающей нагрузки приняты по результатам испытания серии крупномасштабных моделей балочных конструкций.

Таблица 3

Планирование экспериментальных исследований на крупномасштабных моделях балки

Table 4

Design of experimental studies on large-scale beam models

Задача серии экспериментов  The task of a series of experiments	Номер серии опытов (значения по 3 методам расчета)  Experiment se- ries number (values ac- cording to 3 calculation methods)	Параметры образцов  Sample parameters		
		$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>   kg/m <sup>3</sup>	T, %	P, мм  mm
Изучение влияния места отбора древесины по высоте ствола дерева Studying the influence of the location of wood selection according to the height of the tree trunk	1	427,5	24	32
	2	471,6	24	32
	3	427,5	64	32
Изучение соотношения площади поперечного сечения древесины, поврежденной огнем, к об- щей площади поперечного сечения  Study of the ratio of the cross-sectional area of wood damaged by fire to the total cross-sectional area	4	471,6	64	32
	5	427,5	24	50
	6	471,6	24	50
Исследование влияния толщины ламелей  Study of the influence of the thickness of the lamellas	7	427,5	64	50
	8	471,6	64	50

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Исходные данные многофакторного эксперимента

Table 2

Initial data of a multifactorial experiment

Номер серии опытов (по 3 образца в каждой серии)   Experiment series number (3 samples in each series)	Параметры образцов   Sample parameters			Равномерно распределенная нагрузка, при которой происходит разрушение образца, Q, кН/м   Uniformly distributed load at which sample destruction occurs, Q, kN/m			
	ρ, кг/м <sup>3</sup>   kg/m <sup>3</sup>	T, %	P, мм   mm	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>ср</sub>
1	427,5	24	32	44,62	45,05	44,20	44,62
2	471,6	24	32	45,10	46,26	45,83	45,73
3	427,5	64	32	41,56	41,98	40,78	41,44
4	471,6	64	32	43,12	42,42	42,04	42,53
5	427,5	24	50	42,36	41,88	42,63	42,29
6	471,6	24	50	43,98	43,06	43,26	43,43
7	427,5	64	50	38,88	39,78	39,10	39,14
8	471,6	64	50	39,52	40,14	40,65	40,10

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Для того, чтобы восстановить матрицу планирования, необходимо выполнить кодирование данных эксперимента. Выполним расчёт значений верхнего уровня (ВУ), нижнего уровня (НУ), основного

уровня (ОУ) и интервал варьирования (ИВ) для каждого фактора по следующим формулам:

$$ОУ_i = \frac{ВУ_i + НУ_i}{2}, \quad (1)$$

$$ИВ_i = ВУ_i - ОУ_i. \quad (2)$$

Таблица 3

Значения уровней факторов и интервалов варьирования

Table 3

Values of factor levels and variation intervals

Фактор   Factor	ВУ   TL	НУ   LL	ОУ   ML	ИВ   VI
ρ, кг/м <sup>3</sup>   kg/m <sup>3</sup>	471,6	427,5	449,55	22,05
T, %	64	24	44	20
P, мм   mm	50	32	41	9

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Переход к матрице планирования осуществляется путем кодирования натуральных значений параметров оптимизации. В рамках решаемой задачи имеется только один параметр оптимизации, который целесообразно обозначить как "у". Факторы будут закодированы в том же порядке, в котором они указаны в

задании:  $x_1$  соответствует плотности древесины в зависимости от места отбора по высоте ствола,  $x_2$  – поперечному сечению древесины, поврежденной огнем воздействием, к общей площади поперечного сечения клееной балки, а  $x_3$  – толщине применяемых ламелей. Матрица планирования эксперимента представлена в табл. 4.

Матрица планирования эксперимента

Table 4

Experiment planning matrix

Матрица планирования эксперимента  Experiment planning matrix							
Номер опыта  Experience number	Факторы  Factors			Параметр оптимизации  Optimization parameter			
	ρ, кг/м <sup>3</sup>   kg/m <sup>3</sup>	Т, %	Р, мм  mm	Q, кН/м  kN/m			
				у <sub>1</sub>	у <sub>2</sub>	у <sub>3</sub>	у <sub>ср</sub>
1	-	-	-	44,62	45,05	44,20	44,62
2	+	-	-	45,10	46,26	45,83	45,73
3	-	+	-	41,56	41,98	40,78	41,44
4	+	+	-	43,12	42,42	42,04	42,53
5	-	-	+	42,36	41,88	42,63	42,29
6	+	-	+	43,98	43,06	43,26	43,43
7	-	+	+	38,88	39,78	39,10	39,14
8	+	+	+	39,52	40,14	40,65	40,10

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Анализ данных

где n – число параллельных опытов (n=3).

Определим статистическую дисперсию опытов по формуле (3):

Корень из статистической дисперсии есть среднеквадратическое отклонение опыта или ошибка опыта.

$$S_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (y_{ju} - \bar{y}_j)^2, \quad (3)$$

Таблица 5

Вычисление статистической дисперсии и ошибки опыта

Table 5

Calculation of statistical variance and experimental error

Матрица планирования для 3 факторов Planning matrix for 3 factors								S <sub>j</sub> <sup>2</sup>	S <sub>j</sub>	S <sub>max</sub>
Номер опыта  Experience number	Факторы  Factors			Параметр оптимизации  Optimization parameter						
	ρ, кг/м <sup>3</sup>   kg/m <sup>3</sup>	Т, %	Р, мм  mm	у <sub>1</sub>	у <sub>2</sub>	у <sub>3</sub>	у <sub>ср</sub>			
1	-	-	-	44,62	45,05	44,20	44,62	0,18	0,43	0,61
2	+	-	-	45,10	46,26	45,83	45,73			
3	-	+	-	41,56	41,98	40,78	41,44			
4	+	+	-	43,12	42,42	42,04	42,53			
5	-	-	+	42,36	41,88	42,63	42,29			
6	+	-	+	43,98	43,06	43,26	43,43			
7	-	+	+	38,88	39,78	39,10	39,14			
8	+	+	+	39,52	40,14	40,65	40,10			

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

### Проверка однородности дисперсий

Для проверки однородности дисперсий используется G-критерий (критерий Кохрена). Для этого необходимо вычислить G-критерий для дисперсий, полученных в результате обработки экспериментальных данных ( $G_p$ ), и сравнить его с табличным значением G-критерия ( $G_t$ ). Если выполняется условие (4), то можно считать, что дисперсии однородны.

$$G_p < G_t. \quad (4)$$

Значение G-критерия для дисперсий, полученных в результате обработки экспериментальных данных, можно рассчитать по формуле (5)

$$G_p = \frac{S_{max}^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2} \quad (5),$$

где  $S_{max}$  — максимальное значение из дисперсий знаменателя ( $S_{max} = 0,61$ ).

Таким образом,  $G_p = 0,1754$ .

Таблица 6

Значения критерия Кохрена (G-критерия) при 5% уровне значимости

Table 6

Values of Cochran's test (G-test) at 5% significance level

$f_1 \backslash N$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	0,9065	0,7679	0,6841	0,6287	0,5895	0,5598	0,5365	0,5175	0,5017
6	0,7808	0,6161	0,5321	0,4803	0,4447	0,4184	0,3980	0,3817	0,3682
8	0,6798	0,5157	0,4377	0,3910	0,3595	0,3362	0,3185	0,3043	0,2926
10	0,6020	0,4450	0,3733	0,3311	0,3029	0,2823	0,2666	0,2541	0,2439
12	0,5410	0,3924	0,3624	0,2880	0,2624	0,2439	0,2299	0,2187	0,2098
15	0,4709	0,3346	0,2758	0,2419	0,2195	0,2034	0,1911	0,1815	0,1736
20	0,3894	0,2705	0,2205	0,1921	0,1735	0,1602	0,1501	0,1422	0,1357

В таблице присутствует неизвестный параметр  $f_1$ , который представляет собой число степеней свободы и вычисляется с использованием формулы (6).

$$f_1 = n - 1. \quad (6)$$

В нашем случае, значение  $N$  равно 8, а  $f_1$  равно 2. Следовательно, выбираем значение  $G_t = 0,5157$ .

Исходя из выполнения неравенства (4) для интервала ( $0,1754 < 0,5157$ ), делаем вывод о однородности дисперсий. Таким образом, условие однородности выполняется.

### Определение ошибки эксперимента и дисперсии воспроизводимости

Ошибку эксперимента можно вычислить как корень из дисперсии воспроизводимости, используя формулу (7). В этой формуле  $N$  обозначает количество строк в матрице планирования,  $N=8$ .

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j^2 \quad (7)$$

Таким образом, получаем:  $S_y^2 = 0,2643$ ;  $S_y = 0,514$ .

### Вычисление коэффициентов регрессии

Предположим, что уравнение регрессии является линейным, и поэтому нам нужно вычислить пять коэффициентов: один из них – это свободный член ( $b_0$ ), а остальные четыре коэффициента описывают линейные эффекты. Кроме того, нам нужно определить шесть коэффициентов взаимодействия. Формула (8) используется для вычисления свободного члена, а формула (9) – для остальных коэффициентов. Формула (10) применяется для расчета коэффициентов взаимодействия.

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{y}_j \quad (8),$$

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} \bar{y}_j \quad (9);$$

$$b_{uj} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{uj} x_{ij} \bar{y}_j \quad (10)$$

По результатам расчета коэффициентов регрессии получим следующие значения:

Таблица 7

Коэффициенты регрессии, отражающие линейное взаимодействие

Table 7

Regression coefficients reflecting linear interaction

№ опыта  Experience no.	Коэффициенты регрессии, отражающие линейное взаимодействие  Regression coefficients reflecting linear interaction						
	$b_0$	$x_1 y_{cp}$	$b_1$	$x_2 y_{cp}$	$b_2$	$x_3 y_{cp}$	$b_3$
1	42,425	44,62	0,523	-44,62	-1,594	-44,62	-1,155
2		-45,73		-45,73		-45,73	
3		41,44		41,44		-41,44	
4		-42,53		42,53		-42,53	
5		42,29		-42,29		42,29	
6		-43,43		-43,43		43,43	
7		39,25		39,25		39,25	
8		-40,10		40,10		40,10	
	значимый  significant		значимый  significant		значимый  significant		значимый  significant

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Таблица 8

Коэффициенты регрессии, описывающие эффекты взаимодействия

Table 8

Regression coefficients describing interaction effects

Коэффициенты регрессии, описывающие эффекты взаимодействия  Regression coefficients describing interaction effects			
$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$	$b_{123}$
-0,04	-0,02	0	-0,03
не значимый  not significant	не значимый  not significant	не значимый  not significant	не значимый  not significant

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

*Проверка статической значимости  
коэффициентов регрессии*

Для вычисления дисперсии коэффициента регрессии воспользуемся формулой (11):

$$S^2\{b_i\} = \frac{S_y^2}{n \cdot N} \quad (11)$$

Отсюда,  $S^2\{b_i\} = 0,011$  и  $S\{b_i\} = 0,105$ .

Чтобы определить доверительный интервал  $\Delta b_i$ , применяем формулу (12):

$$\Delta b_i = t_t \cdot S\{b_i\} \quad (12),$$

где  $t_t$  - коэффициент Стьюдента.

Для данного случая выбираем коэффициент Стьюдента (t-критерий) из таблицы для уровня значимости 5 %.

Коэффициент Стьюдента зависит от числа степеней свободы  $f_2$ , при уровне значимости 5 %:

Число степеней свободы   Number of degrees of freedom	1	2	3	4	5	6	7	8
Значения t-критерия   t-test values	12,71	4,30	3,18	2,78	2,57	2,45	2,37	2,30
Число степеней свободы   Number of degrees of freedom	9	10	11	12	13	14	15	16
Значения t-критерия   t-test values	2,26	2,23	2,20	2,18	2,16	2,14	2,13	2,12
Число степеней свободы   Number of degrees of freedom	17	18	19	20	21	22	23	24
Значения t-критерия   t-test values	2,11	2,10	2,09	2,09	2,08	2,07	2,07	2,06
Число степеней свободы   Number of degrees of freedom	25	26	27	28	29	30	40	60
Значения t-критерия   t-test values	2,06	2,06	2,05	2,05	2,05	2,04	2,02	2,00

Определим число степеней свободы  $f_2$  по формуле (13):

$$f_2 = N(n - 1). \quad (13)$$

Исходя из этого, необходимо выбрать коэффициент Стьюдента для числа степеней свободы, близкого к  $f_2 = 16$ ;  $t_t = 2,12$ . Отсюда получаем  $\Delta b_i = 0,222$ .

Коэффициент регрессии считается значимым, если выполняется неравенство (14):

$$|b_i| > \Delta b_i. \quad (14)$$

В нашем случае, неравенство (14) выполняется для следующих найденных коэффициентов уравнения регрессии:  $b_0, b_1, b_2, b_3$ , которые и остаются в окончательном уравнении.

### Проверка уравнения регрессии на адекватность

В результате исключения незначимых коэффициентов регрессии полученное уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$\tilde{y}_j = b_0 + b_1 x_{1j} + b_2 x_{2j} + b_3 x_{3j} + b_{12} x_{1j} x_{2j}. \quad (15)$$

Для проверки адекватности полученного уравнения регрессии воспользуемся критерием Фишера. Чтобы его определить, необходимо вычислить дисперсию адекватности, которая рассчитывается по формуле (16).

$$S_{ad}^2 = \frac{n}{f_3} \sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - \tilde{y}_j)^2, \quad (16)$$

где число степеней свободы  $f_3$  рассчитывается по формуле (17)

$$f_3 = N - (k + 1), \quad (17)$$

где  $k=2$ . Отсюда  $f_3 = 8 - 3 = 5$ .

В табл. 9 приведены расчетные значения параметра оптимизации для каждой строки матрицы планирования ( $\tilde{y}_j$ ), а также средние значения этого параметра, полученные в ходе эксперимента.



Расчетные значения критерия Фишера

Table 9

Estimated values of Fisher's criterion

Коэффициенты регрессии  Regression coefficients					Вычисление $\tilde{y}_j$   Calculation $\tilde{y}_j$	$S_{ад}^2$	$F_p$	$F_T$
$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$				
42,425	0,523	-1,594	-1,155	-0,04	44,6117	0,0086	0,033	2,85
42,425	0,523	-1,594	-1,155	-0,04	45,7367			
42,425	0,523	-1,594	-1,155	-0,04	41,5017			
42,425	0,523	-1,594	-1,155	-0,04	42,4700			
42,425	0,523	-1,594	-1,155	-0,04	42,3017			
42,425	0,523	-1,594	-1,155	-0,04	43,4267			
42,425	0,523	-1,594	-1,155	-0,04	39,1917			
42,425	0,523	-1,594	-1,155	-0,04	40,1600			

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Используя данные из табл. 7, можем подставить их в уравнение (16):

$$S_{ад}^2 = 0,033 \quad (18)$$

Затем, согласно формуле (19), рассчитаем критерий Фишера:

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} \quad (19)$$

Отсюда получаем:  $F_p = 0,033$ .

Чтобы определить, является ли модель адекватной, проверим выполнение соотношения (20):

$$F_p < F_t \quad (20)$$

где  $F_t$  – табличное значение критерия Фишера, для  $F_t = 2.85$ .

Можно сделать вывод о том, что неравенство (20) выполняется ( $0,033 < 2,85$ ), следовательно, модель можно считать адекватной.

### Результаты

*Переход к уравнению регрессии в натуральных обозначениях*

По нашей текущей стадии работы получена математическая модель, которая позволяет оптимизировать параметр в кодовых обозначениях. Для продолжения обработки нам нужно перейти к использованию натуральных обозначений. Для этого необходимо воспользоваться формулой (21).

$$x_j = \frac{H_j - OY_j}{ИВ_j}, \quad (21)$$

где  $H_j$  – натуральное обозначение j-го фактора.

Подставив значения коэффициентов регрессии в уравнение (15) и сделав замену факторов в кодовых обозначениях согласно уравнению (21), мы получим:

$$y = 42,425 + 0,523x_1 + (-1,594)x_2 + (-1,155)x_3 + (-0,04)x_1x_2 \quad (22)$$

$$\Delta Q = 42,425 + 0,523 \frac{\rho - OY_\rho}{ИВ_\rho} - 1,594 \frac{T - OY_T}{ИВ_T} - 1,155 \frac{P - OY_P}{ИВ_P} - 0,04 \frac{\rho - OY_\rho}{ИВ_\rho} \cdot \frac{T - OY_T}{ИВ_T}$$

$$\Delta Q = 42,425 + 0,523 \frac{\rho - 449,55}{22,05} - 1,594 \frac{T - 44}{20} - 1,155 \frac{P - 41}{9} - 0,04 \frac{\rho - 449,55}{22,05} \cdot \frac{T - 44}{20} \quad (23)$$

В итоге получим следующее уравнение регрессии:

$$\Delta Q = 38,7366 - 0,0277\rho - 0,0389T - 0,1283P - 0,00009\rho T \quad (24)$$

С помощью полученного уравнения регрессии можно определить разрушающую нагрузку для деревянных балочных конструкций, изготовленных с применением древесины, подвергнутой термическим повреждениям, в зависимости от трех вариативных факторов. Подставив соответствующие значения этих факторов, мы сможем получить точное значение разрушающей нагрузки [19].

### Оптимизация результатов

Для того, чтобы обеспечить максимальную прочность образца, используя наименьшее количество материалов при его изготовлении, необходимо

составить таблицу, чтобы оптимизировать этот процесс.

Таблица 10

Таблица оптимизации

Table 10

Optimization table

Описание  Description	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>   kg/m <sup>3</sup>	T, %	P, мм  mm
Основной уровень фактора  Basic factor level	449,55	44	41
Коэффициент регрессии $b_i$   Regression coefficient $b_i$	0,523	-1,594	-1,155
Интервал варьирования  Variation interval	22,05	10	9
Произведение $b_i$ на ИВ $_i$   Multiplication $b_i$ on $VI_i$	11,532	-15,94	-10,395
Шаг движения по поверхности отклика  Step of movement along the response surface	22,05	5	3

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Подставляя численные значения варьируемых факторов в уравнение регрессии в интервале от нижнего (НУ) до верхнего уровня (ВУ) с шагом, равным интервалу варьирования (ИВ), приведенным в

табл. 3, получим значения равномерно распределенной нагрузки, Q, кН/м, при которой происходит разрушение образцов.

Таблица 11

Определение оптимального сочетания значений факторов

Table 11

Determination of the optimal combination of factor values

Описание  Description	$\rho$	T	P	Q
Округленный шаг движения по поверхности отклика  Rounded step of movement along the response surface	1	5	3	
Мысленный опыт №1  Thought Experience №1	427,5	24	32	44,61
Мысленный опыт №2  Thought Experience №2	449,55	24	32	45,17
Мысленный опыт №3  Thought Experience №3	471,6	24	32	45,73
Мысленный опыт №4  Thought Experience №4	427,5	29	35	43,83
Мысленный опыт №5  Thought Experience №5	449,55	29	35	44,38

Описание  Description	$\rho$	$T$	$P$	$Q$
Мысленный опыт №6  Thought Experience №6	471,6	34	38	44,14
Мысленный опыт №7  Thought Experience №7	427,5	34	38	43,06
Мысленный опыт №8  Thought Experience №8	449,55	39	41	42,82
Мысленный опыт №9  Thought Experience №9	471,6	39	41	43,35
Мысленный опыт №10  Thought Experience №10	427,5	44	44	41,51
Мысленный опыт №11  Thought Experience №11	449,55	44	44	42,03
Мысленный опыт №12  Thought Experience №12	471,6	49	47	41,76
Мысленный опыт №13  Thought Experience №13	427,5	49	47	40,74
Мысленный опыт №14  Thought Experience №14	449,55	54	50	40,46
Мысленный опыт №15  Thought Experience №15	471,6	59	50	40,56

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

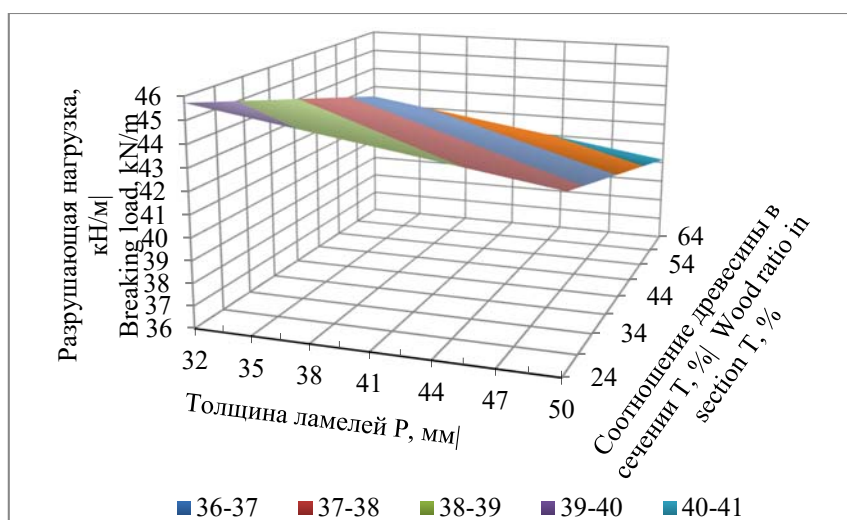


Рисунок 1. Теоретическая зависимость прочности исследуемых конструкций от факторов «Т», «Р»

Figure 1. Theoretical dependence of the strength of the structures under study on factors «T», «P»

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Выводы: в результате планирования эксперимента получены следующие эмпирические формулы (25)...(27), на основе которых построены графики

влияния каждого фактора на прочность клееной балочной конструкции (рис. 2).

$$f(\rho) = 33,6974 - 0,0255\rho \quad (25)$$

$$f(P) = 49,8363 - 0,1283P \quad (26)$$

$$f(T) = 47,6973 - 0,0818T \quad (27)$$

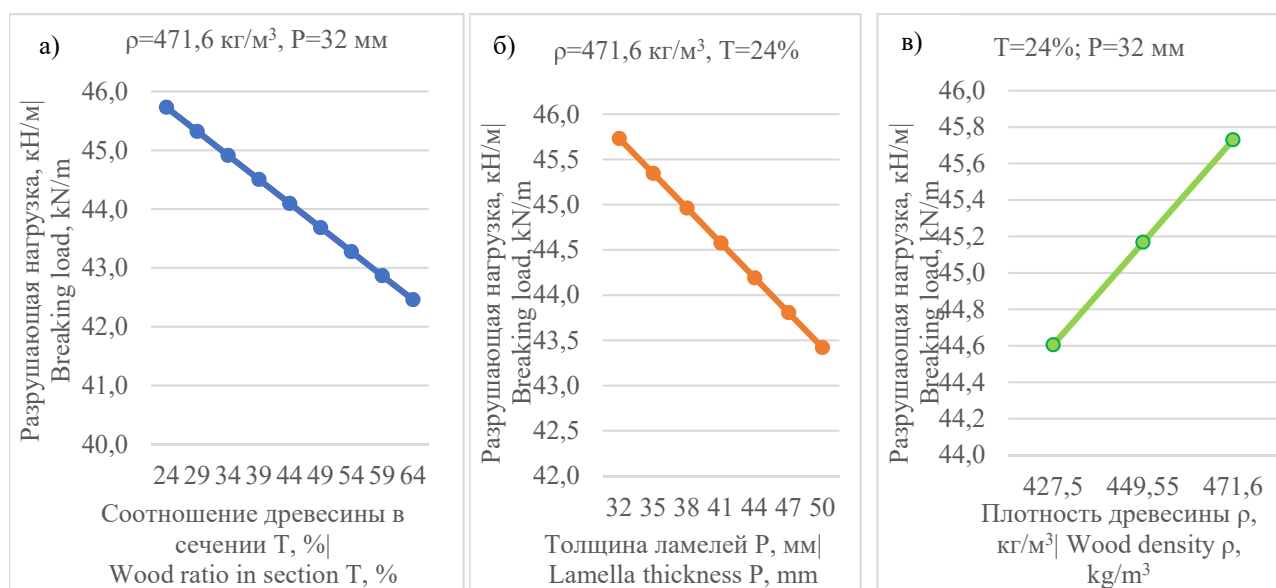


Рисунок 2. Влияние факторов « $\rho$ », « $T$ », « $P$ » на прочность КДК с применением термически поврежденной древесины

Figure 2. Influence of factors « $\rho$ », « $T$ », « $P$ » on the strength of LTS using thermally damaged wood

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Графики, представленные на рис. 2, отражают степень влияния каждого фактора на прочность экспериментальных образцов. Очевидно, что наибольшее влияние оказывает соотношение термически поврежденной древесины в сечении к общей массе « $T$ », затем толщина ламелей « $P$ », наименьшее влияние оказывает плотность древесины « $\rho$ ».

### Обсуждение

В соответствии с поставленной целью авторами выполнено планирование многофакторного эксперимента, в результате которого получено уравнение регрессии (24), подставляя значения варьируемых факторов в которое можно определить максимальную несущую способность КДК с применением термически поврежденной древесины сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) и, соответственно, оптимальные параметры для ее изготовления: средняя плотность сырьевой древесины, применяемой в качестве материала конструкции – 471,6 кг/м<sup>3</sup>. Место отбора древесины с данной плотностью – комлевая часть ствола. Оптимальное соотношение площади

поперечного сечения древесины, поврежденной огнем воздействием, к общей площади поперечного сечения клееной балки – 24%. Толщина ламелей – 32 мм. В соответствии с требованиями ГОСТ 20850-2014 и табл. 10 СП 64.13330.2017 принимаем толщину ламелей, равную 33 мм.

Фактически полученные факторы подтверждают результаты эксперимента на масштабных моделях, поскольку серия балок с таким соотношением варьируемых факторов, обеспечивающих наивысшую несущую способность, уже была изготовлена и испытана перед планированием эксперимента (серия 2 в табл. 2). Среднее значение равномерно распределенной разрушающей нагрузки составило 45,73 кН/м.

К сожалению, анализ литературных источников со схожими исследованиями не дал результатов, поскольку испытания КДК с использованием древесины сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.), термически поврежденной воздействием лесного пожара, до настоящего времени не проводились, поэтому сравнить результаты эксперимента с публикациями других авторов не представляется возможным.

В дальнейшем планируется изготовление и натурные испытания балочной конструкции пролетом 6,0 м сечением 140x500(h) мм с приведенными выше параметрами с целью дальнейшего внедрения термически поврежденной древесины в производство. Результаты исследований термически поврежденной древесины сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) помогут сформировать строительные нормы, технические условия и практические рекомендации по расчету, проектированию и производству таких типов конструкций. Применение термически поврежденной древесины при изготовлении клееных деревянных конструкций позволит значительно сократить использование высокосортного пиломатериала при некоторых изменениях технологического процесса, не приводящих к его удорожанию, а также частично решить вопросы ресурсосбережения высокосортной древесины и снизить загрязнение окружающей среды, заключающееся в санитарной вырубке лесов после пожара.

### Заключение

На основании планирования эксперимента получено уравнение регрессии (24):

$$\Delta Q = 38,7366 - 0,0277N - 0,0389T - 0,1283P - 0,00009NT$$

Критерий адекватности Фишера  $F_p = 0,033$ . Уравнение адекватно, поскольку выполняется условие:  $F_p < F_t$ , где  $F_t$  – табличное значение критерия Фишера, для  $F_t = 2,85$ .

Уравнение регрессии описывает экспериментальные данные разрушающей экспериментальной нагрузки в зависимости от следующих вариативных факторов:

- место отбора древесины по высоте ствола дерева;
- соотношение площади поперечного сечения древесины, поврежденной огнем воздействием, к общей площади поперечного сечения клееной балки;
- толщина применяемых ламелей.

Для проведения испытаний балочных конструкций по результатам планирования эксперимента было определено оптимальное соотношение параметров, при котором достигается максимальная несущая способность конструкции:

1. Оптимальная средняя плотность сырьевой древесины, применяемой в качестве материала конструкции – 471,6 кг/м<sup>3</sup>. Место отбора древесины с данной плотностью – комлевая часть ствола;
2. Оптимальное соотношение площади поперечного сечения древесины, поврежденной огнем воздействием, к общей площади поперечного сечения клееной балки – 24 %;
3. Выбрана оптимальная толщина ламелей – 33 мм (в соответствии с требованиями ГОСТ 20850-2014 и табл. 10 СП 64.13330.2017).

### Список литературы

1. Martinov V., Lisyatnikov M., Roshchina S., Lukina A. (2024). Physical and Mechanical Properties of Coniferous Wood After Exposure to Fire. In: Proceedings of MPCPE 2022. MPCPE 2022. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 335. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-30570-2\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-031-30570-2_18).
2. Mechanical and microstructural changes in post-fire raw wood / A. Lukina [et al.] // Architecture and Engineering. – 2022. – Vol. 7, No. 3. – P. 44-52. – DOI 10.23968/2500-0055-2022-7-3-44-52. – EDN OHGQVJ. Режим доступа: <https://elibrary.ru/ohgqvj>.
3. Прочностные свойства сырой древесины после лесного пожара / А. Лукина, М. Лисятников, М. Лукин [и др.] // Гражданский журнал. – 2023. – № 3(119). – С. 11907. – DOI 10.34910/MCE.119.7. Режим доступа: <https://elibrary.ru/JIUHQK>.
4. Прочность и деформативность сырьевой древесины после огневого воздействия / А. В. Лукина [и др.], // Строительство и реконструкция. – 2022. – № 6(104). – С. 40-49. – DOI 10.33979/2073-7416-2022-104-6-40-49. Режим доступа: <https://elibrary.ru/FUHDDN>.
5. Chernykh, A. Ecological peculiarities and problems of glued timber structures reinforcement / A. Chernykh, S. Mironova, S. Mamedov // RocznikOchronaSrodowiska. – 2020. – Vol. 22, No. 1. – P. 203-213. – EDN DCNSJS.
6. Снегирева, С. Н. Исследование твердости древесины сосны, поврежденной сильным низовым и верховым пожаром / С. Н. Снегирева, А. Д. Платонов, Е. В. Кантиева // Эколого-ресурсосберегающие технологии в науке и технике : материалы Всероссийской научно-технической конференции, Воронеж, 19–20 октября 2021 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2021. – С. 188-191. – DOI 10.34220/ERSTST2021\_188-191. – EDN LOJTVY.
7. Снегирева, С. Н. Твердость комлевой древесины сосны, поврежденной различными видами пожара после длительного хранения / С. Н. Снегирева, А. Д. Платонов, Е. В. Кантиева // ЗЕЛЕНАЯ ЭКОНОМИКА: "IFOREST" : Материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 29 сентября 2021 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2021. – С. 104-108. – DOI 10.34220/ZEIF2022\_104-108. – EDN ENAPWH.
8. Density formation along the trunk radius in various wood species based on latitudinal or altitudinal zoning / A. V. Kiseleva, S. N. Snegireva, A. D. Platonov, O. A. Pinchevska // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Voronezh, 23 октября 2020 года. – Voronezh, 2020. – P. 012055. – DOI 10.1088/1755-1315/595/1/012055. – EDN AJVFIR.
9. Lukin M, Prusov E, Roshchina S, Karelina M, Vatin N. Multi-Span Composite Timber Beams with Rational Steel Reinforcements. Buildings. 2021; 11(2):46. <https://doi.org/10.3390/buildings11020046>.
10. Kasymov, Denis & Agafontsev, Mikhail & Tarakanova, Veronika & Loboda, E & Martynov, P & Orlov, Konstantin & Reyno, Vladimir. (2021). Effect of wood structure geometry during firebrand generation in laboratory scale and semi-field experiments. Journal of Physics: Conference Series. 1867. 012020. 10.1088/1742-6596/1867/1/012020.
11. Snegireva, Svetlana & Platonov, Aleksey & Kiseleva, Aleksandra & Kantieva, Ekaterina. (2022). Variability of the hardness of pine wood damaged by strong grassroots and rampant riding fire. Forestry Engineering Journal. 11. 79-87. 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/7.
12. Влияние пожара на толщину клеточных стенок древесины сосны / С. Н. Снегирева, А. Д. Платонов, О. М. Мазекина, Н. Г. Кеян // Перспективные ресурсосберегающие технологии развития лесопромышленного комплекса : Материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Воронеж, 29 сентября 2023 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2023. – С. 240-242. – DOI 10.58168/R-STD TIC2023\_240-242. – EDN WZCXVO.
13. Strength properties of raw wood after a wildfire / A. Lukina, M. Lisyatnikov, M. Lukin [et al.] // Magazine of Civil Engineering. – 2023. – No. 3(119). – P. 11907. – DOI 10.34910/MCE.119.7. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53806550>.

14. Gribanov, A. S. Experimental investigations of composite wooden beams with local wood modification / A. S. Gribanov, V. I. Rimshin, S. I. Roshchina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety, Chelyabinsk, 25–27 сентября 2019 года. Vol. 687, 3. – Chelyabinsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 033039. – DOI 10.1088/1757-899X/687/3/033039. Режимдоступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43233459>.

15. Влагодпроводность древесины сосны, поврежденной пожаром, при атмосферной сушке / А. Д. Платонов, С. Н. Снегирева, Е. В. Кантиева [и др.] // Перспективные ресурсосберегающие технологии развития лесопромышленного комплекса : Материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Воронеж, 29 сентября 2023 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2023. – С. 126-129. – DOI 10.58168/R-STDTC2023\_126-129. – EDN DEFNQF.

16. Löf, Magnus & Madsen, Palle & Metslaid, Marek & Witzell, Johanna & Jacobs, Douglass. (2019). Restoring forests: regeneration and ecosystem function for the future. *New Forests*. 50. 139-151. 10.1007/s11056-019-09713-0.

17. Ковтун, И. Ю. Механизм изменения физико-механических свойств древесины при различных температурах и времени термообработки / И. Ю. Ковтун, А. З. Мальцева // Матрица научного познания. – 2021. – № 11-2. – С. 45-50. Режимдоступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47276526>.

18. Федотов, И. О. Параметры обугливания древесины с огнезащитой для расчетной методики оценки пределов огнестойкости деревянных конструкций / И. О. Федотов, П. В. Халепа, А. Б. Сивенков // Актуальные проблемы и инновации в обеспечении безопасности : Сборник материалов Дней науки с международным участием, Екатеринбург, 06–10 декабря 2021 года / Уральский институт ГПС МЧС России. Том Часть 1. – Екатеринбург: Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, 2022. – С. 262-266. Режимдоступа: <https://elibrary.ru/IQGDAG>.

19. Sergeev, Michail & Lukin, M & Strekalkin, A & Roshchina, Svetlana. (2021). Mathematical modeling of stress-strain state of the nodal joint of wooden beams. *Journal of Physics: Conference Series*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/3/032088>.

20. Zaytsev, D. A. Wood density of pine and spruce stands according to trees diameter distribution after thinning / D. A. Zaytsev, D. A. Danilov, S. V. Navalihin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : International Jubilee Scientific and Practical Conference "Innovative Directions of Development of the Forestry Complex (FORESTRY-2018)", Voronezh, 04–05 октября 2018 года. Vol. 226, conference 1. – Institute of Physics Publishing: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012065. – DOI 10.1088/1755-1315/226/1/012065. – EDN WUMJQN.

21. Технология изготовления клееных деревянных конструкций с применением древесины, поврежденной огнем воздействием лесного пожара / В. А. Мартынов, М. С. Лисятников, А. В. Лукина, С. И. Рощина // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13, № 4(52). – С. 158-177. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.4/10. – EDN ZIBLMX.

### References

1. Martinov, V., Lisyatnikov, M., Roshchina, S., Lukina, A. (2024). Physical and Mechanical Properties of Coniferous Wood After Exposure to Fire. In: Vatin, N., Roshchina, S., Serdjuks, D. (eds) *Proceedings of MPCPE 2022. MPCPE 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 335. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-30570-2\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-031-30570-2_18).

2. Mechanical and microstructural changes in post-fire raw wood / A. Lukina, M. Lisyatnikov, V. Martinov [et al.] // *Architecture and Engineering*. – 2022. – Vol. 7, No. 3. – P. 44-52. – DOI 10.23968/2500-0055-2022-7-3-44-52. – EDN OHGQVJ. Режимдоступа: <https://elibrary.ru/ohgqvj>.

3. Strength properties of raw wood after a forest fire / A. Lukina, M. Lisyatnikov, M. Lukin [et al.] // *Civil Journal*. – 2023. – № 3(119). – P. 11907. – DOI 10.34910/MCE.119.7. Access mode: <https://elibrary.ru/JIUHQK>.

4. Strength and deformability of raw wood after fire exposure / A.V. Lukina, M. S. Lisyatnikov, V. A. Martynov, S. I. Roshchina // Construction and reconstruction. – 2022. – № 6(104). – Pp. 40-49. – DOI 10.33979/2073-7416-2022-104-6-40-49. Access mode: <https://elibrary.ru/FUHDDN>.
5. Chernykh, A. Ecological peculiarities and problems of glued timber structures reinforcement / A. Chernykh, S. Mironova, S. Mamedov // RocznikOchronaSrodowiska. – 2020. – Vol. 22, No. 1. – P. 203-213. – EDN DCNSJS.
6. Snegireva, S. N. Investigation of the hardness of pine wood damaged by a strong grassroots and upper fire / S. N. Snegireva, A.D. Platonov, E. V. Kantieva // Ecological and resource-saving technologies in science and technology : materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference, Voronezh, October 19-20, 2021. – Voronezh: Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 2021. – pp. 188-191. – DOI 10.34220/ERSTST2021\_188-191. – EDN LOJTVY.
7. Snegireva, S. N. Hardness of lumpy pine wood damaged by various types of fire after long-term storage / S. N. Snegireva, A.D. Platonov, E. V. Kantieva // GREEN ECONOMY: "IFOREST" : Materials of the international scientific and practical conference, Voronezh, September 29, 2021. – Voronezh: Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 2021. – pp. 104-108. – DOI 10.34220/ZEIF2022\_104-108. – EDN ENAPWH.
8. Density formation along the trunk radius in various wood species based on latitudinal or altitudinal zoning / A. V. Kiseleva, S. N. Snegireva, A. D. Platonov, O. A. Pinchevska // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Voronezh, 23 октября 2020 года. – Voronezh, 2020. – P. 012055. – DOI 10.1088/1755-1315/595/1/012055. – EDN AJVFIR.
9. Lukin M, Prusov E, Roshchina S, Karelina M, Vatin N. Multi-Span Composite Timber Beams with Rational Steel Reinforcements. Buildings. 2021; 11(2):46. <https://doi.org/10.3390/buildings11020046>.
10. Kasymov, Denis & Agafontsev, Mikhail & Tarakanova, Veronika & Loboda, E & Martynov, P & Orlov, Konstantin & Reyno, Vladimir. (2021). Effect of wood structure geometry during firebrand generation in laboratory scale and semi-field experiments. Journal of Physics: Conference Series. 1867. 012020. 10.1088/1742-6596/1867/1/012020.
11. Snegireva, Svetlana & Platonov, Aleksey & Kiseleva, Aleksandra & Kantieva, Ekaterina. (2022). VARIABILITY OF THE HARDNESS OF PINE WOOD DAMAGED BY STRONG GRASSROOTS AND RAMPANT RIDING FIRE. Forestry Engineering Journal. 11. 79-87. 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/7.
12. The effect of fire on the thickness of the cell walls of pine wood / S. N. Snegireva, A.D. Platonov, O. M. Mazekina, N. G. Keyan // Promising resource-saving technologies for the development of the timber industry : Materials of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students, Voronezh, September 29, 2023. – Voronezh: Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 2023. – pp. 240-242. – DOI 10.58168/R-STD TIC2023\_240-242. – EDN WZCXVO.
13. Strength properties of raw wood after a wildfire / A. Lukina, M. Lisyatnikov, M. Lukin [et al.] // Magazine of Civil Engineering. – 2023. – No. 3(119). – P. 11907. – DOI 10.34910/MCE.119.7. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53806550>.
14. Griбанov, A. S. Experimental investigations of composite wooden beams with local wood modification / A. S. Griбанov, V. I. Rimshin, S. I. Roshchina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety, Chelyabinsk, 25–27 сентября 2019 года. Vol. 687, 3. – Chelyabinsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 033039. – DOI 10.1088/1757-899X/687/3/033039. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43233459>.
15. Moisture conductivity of pine wood damaged by fire during atmospheric drying / A.D. Platonov, S. N. Snegireva, E. V. Kantieva [et al.] // Promising resource-saving technologies for the development of the timber industry complex : Materials of the International Scientific and practical Conference of Young Scientists and Students, Voronezh, September 29, 2023. – Voronezh: Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 2023. – pp. 126-129. – DOI 10.58168/R-STD TIC2023\_126-129. – EDN DEFNQF.
16. Löf, Magnus & Madsen, Palle & Metslaid, Marek & Witzell, Johanna & Jacobs, Douglass. (2019). Restoring forests: regeneration and ecosystem function for the future. New Forests. 50. 139-151. 10.1007/s11056-019-09713-0.



17. Kovtun, I. Yu. The mechanism of changing the physical and mechanical properties of wood at different temperatures and heat treatment time / I. Yu. Kovtun, A. Z. Maltseva // The matrix of scientific knowledge. – 2021. – No. 11-2. – pp. 45-50. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47276526> .

18. Fedotov, I. O. Parameters of wood charring with fire protection for the calculation methodology for assessing the fire resistance limits of wooden structures / I. O. Fedotov, P. V. Halepa, A. B. Sivenkov // Actual problems and innovations in safety : Collection of materials of the Days of Science with international participation, Yekaterinburg, December 06-10, 2021 / Ural Institute of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia. Volume Part 1. – Yekaterinburg: Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2022. – pp. 262-266. Access mode: <https://elibrary.ru/IQGDAG>.

19. Sergeev, Michail & Lukin, M & Strekalkin, A & Roshchina, Svetlana. (2021). Mathematical modeling of stress-strain state of the nodal joint of wooden beams. Journal of Physics: Conference Series. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/3/032088>.

20. Zaytsev, D. A. Wood density of pine and spruce stands according to trees diameter distribution after thinning / D. A. Zaytsev, D. A. Danilov, S. V. Navalihin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : International Jubilee Scientific and Practical Conference "Innovative Directions of Development of the Forestry Complex (FORESTRY-2018)", Voronezh, 04–05 октября 2018 года. Vol. 226, conference 1. – Institute of Physics Publishing: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012065. – DOI 10.1088/1755-1315/226/1/012065. – EDN WUMJQN.

21. Technology for the manufacture of laminated timber structures using wood damaged by the fire of a forest fire / V. A. Martynov, M. S. Lisyatnikov, A. V. Lukina, S. I. Roshchina // Forestry Journal. – 2023. – Т. 13, No. 4(52). – pp. 158-177. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.4/10. – EDN ZIBLMX.

### Сведения об авторах

*Мартынов Владислав Алексеевич* – ассистент кафедры строительных конструкций, Институт архитектуры, строительства и энергетики, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых» (ВлГУ), ул. Горького, 87, г. Владимир, Российская Федерация, 600000, <http://orcid.org/0000-0002-6570-0265>, e-mail: [martynov3369@gmail.com](mailto:martynov3369@gmail.com).

*Мясников Даниил Олегович* – инженер кафедры строительных конструкций, Институт архитектуры, строительства и энергетики, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых» (ВлГУ), ул. Горького, 87, г. Владимир, Российская Федерация, 600000, <https://orcid.org/0009-0000-3999-7563>, e-mail: [daniil.miasnikov.96@mail.ru](mailto:daniil.miasnikov.96@mail.ru).

✉ *Рощина Светлана Ивановна* – д.т.н., проф., зав. кафедрой строительных конструкций, Институт архитектуры, строительства и энергетики, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых» (ВлГУ), ул. Горького, 87, г. Владимир, Российская Федерация, 600000, <http://orcid.org/0000-0003-0356-1383>, e-mail: [rsi3@mail.ru](mailto:rsi3@mail.ru).

### Information about the authors

*Vladislav A. Martinov* – assistant of the Department of Civil Engineering, Institute of Architecture, Construction and Energy, Vladimir State University. A.G. and N.G. Stoletovs (VIGU), Gorky street, 87, Vladimir, Russian Federation, 600000, <http://orcid.org/0000-0002-6570-0265>, e-mail: [martynov3369@gmail.com](mailto:martynov3369@gmail.com).

*Daniil O. Miasnikov* – Engineer of the Department of Building Structures, Institute of Architecture, Construction and Energy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Vladimir State University named after. A.G. and N.G. Stoletovykh” (VISU), st. Gorky, 87, Vladimir, Russian Federation, 600000, <https://orcid.org/0009-0000-3999-7563>, e-mail: [daniil.miasnikov.96@mail.ru](mailto:daniil.miasnikov.96@mail.ru).

✉ *Svetlana I. Roshchina* – Doctor of Technical Sciences, Prof., Head. Department of Civil Engineering, Institute of Architecture, Construction and Energy, Vladimir State University. A.G. and N.G. Stoletovs (VIGU), Gorky street, 87, Vladimir, 600000, Russian Federation, <http://orcid.org/0000-0003-0356-1383>, e-mail: [rsi3@mail.ru](mailto:rsi3@mail.ru).

✉ – Для контактов/Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/11>

УДК 630: (678.002 + 674.048)



## Гидрофобизация древесины *Betula pendula* Roth и *Pinus sylvestris* L. отработанным растительным маслом и возможности ее утилизации в биоугольный сорбент для ионов меди

Елена В. Томина<sup>1</sup>, [tomina-e-v@yandex.ru](mailto:tomina-e-v@yandex.ru) <https://orcid.org/0000-0002-5222-0756>

Александр И. Дмитренко<sup>1</sup>, [dmitrenkov2109@mail.ru](mailto:dmitrenkov2109@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0001-9296-1762>

Нгуен Ань Тьен<sup>2</sup>, [tienna@hcmue.edu.vn](mailto:tienna@hcmue.edu.vn) <https://orcid.org/0000-0002-4396-0349>

Константин В. Жужукин<sup>1</sup>, [kinkon18@yandex.ru](mailto:kinkon18@yandex.ru) <https://orcid.org/0000-0002-7093-3274>

Наталья А. Ходосова<sup>1</sup>, [nhodosova@mail.ru](mailto:nhodosova@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0002-2809-717X>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Россия

<sup>2</sup>Педагогический университет Хошимина, ул. Ан Зьонг-Вьонг, 280, округ 4, район 5, Хошимин, Вьетнам

Разработка методов и технологий защитной обработки древесины с целью улучшения её свойств является актуальной задачей. Существующие методы защитной обработки древесины (использование составов, покрытий и красок) имеют определенные недостатки, такие как высокая стоимость, возможность изменения текстуры и цвета древесины, а также токсичность некоторых веществ. В связи с этим целью данной работы было установление эффективности гидрофобизации древесины березы повислой (*Betula pendula* Roth) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) отработанным растительным маслом и тестирование биоугля из такой древесины в качестве углеродного сорбента ионов меди. Модифицирование древесины *B. pendula* и *P. sylvestris* отработанным подсолнечным маслом приводит к значительному повышению гидрофобности биополимерных материалов, водо- и влагостойкость повысилась на 2 и 1,6 раза ( $p < 0,05$ ). Высокая степень межфазного взаимодействия между древесиной березы и сосны с отработанным растительным маслом, характеризуемая значениями краевого угла смачивания  $24 \pm 3,1$  и  $30 \pm 3,9$  ( $p < 0,05$ ) соответственно. Показана возможность получения биоугольных сорбентов из модифицированной древесины для использования в процессах очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов. Степень очистки проб, содержащих ионы меди достигает 35% для модифицированной древесины березы и 18% для образца биоугля из древесины сосны, пропитанной маслом. Эти показатели сопоставимы с данными по очистке раствора от  $\text{Cu}^{2+}$  биоугольными сорбентами из натуральной древесины березы и сосны. В исследовании предложены подходы к утилизации модифицированной древесины с получением функциональных материалов (биоугольных сорбентов), что позволяет создать условия для безотходного производства, снижая при этом антропогенную нагрузку на окружающую среду.

**Ключевые слова:** древесина, *Betula pendula* Roth, *Pinus sylvestris* L., гидрофобизация, биоуголь, сорбция, водостойкость, краевой угол смачивания

**Финансирование:** Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-23-00122, <https://rscf.ru/project/23-23-00122/>.

**Благодарности:** авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.


**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


**Для цитирования:** Гидрофобизация древесины *Betula pendula* Roth и *Pinus sylvestris* L. отработанным растительным маслом и возможности ее утилизации в биоугольный сорбент для ионов меди / Е. В. Томина, А. И. Дмитренко, Нгуен Ань Тьен, К. В. Жужукин, Н. А. Ходосова // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 1 (53). – С. 190–202. – Библиогр.: с. 199–202 (22 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/11>.

*Поступила* 09.01.2024. *Пересмотрена* 01.02.2024. *Принята* 12.02.2024. *Опубликована онлайн* 20.03.2024.



### Article


## Hydrophobization of *Betula pendula* Roth wood and *Pinus sylvestris* L. wood with waste vegetable oil and the possibility of its utilization in a biochar sorbent for copper ions

Elena V. Tomina<sup>1</sup>, [tomina-e-v@yandex.ru](mailto:tomina-e-v@yandex.ru),  0000-0002-5222-0756

Alexander I. Dmitrenkov<sup>1</sup>, [dmitrenkov2109@mail.ru](mailto:dmitrenkov2109@mail.ru),  0000-0001-9296-1762

Nguyen Anh Tien<sup>2</sup>, [tienna@hcmue.edu.vn](mailto:tienna@hcmue.edu.vn). ORCID iD: 0000-0002-4396-0349

Konstantin V. Zhuzhukin<sup>1</sup>, , [kinkon18@yandex.ru](mailto:kinkon18@yandex.ru),  0000-0002-7093-3274

Natalia A. Khodosova<sup>1</sup>, [nhodosova@mail.ru](mailto:nhodosova@mail.ru),  0000-0002-2809-717X

<sup>1</sup>Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh city, 394087, Russian Federation

<sup>2</sup>Ho Chi Minh City University of Education, 278 An Duong Vuong St., Ward 4, District 5, Ho Chi Minh City, Vietnam

### Abstract

The development of methods and technologies for the protective treatment of wood in order to improve its properties is an urgent task. Existing methods of protective wood treatment (the use of compounds, coatings and paints) have certain disadvantages, such as high cost, the possibility of changing the texture and color of wood, as well as the toxicity of some substances. In this regard, the purpose of this work was to establish the effectiveness of hydrophobization of birch (*Betula pendula* Roth) and pine (*Pinus sylvestris*) wood with waste vegetable oil and test biochar from such wood as a carbon sorbent of copper ions. Modification of *Betula pendula* Roth and *Pinus sylvestris* wood with waste sunflower oil leads to a significant increase in the hydrophobicity of biopolymer materials; water and moisture resistance increased by 2 and 1.6 times ( $p < 0.05$ ). A high degree of interfacial interaction between wood of both species and waste vegetable oil, characterized by contact angle values of  $24 \pm 3.1$  and  $30 \pm 3.9$  ( $p < 0.05$ ), respectively. The possibility of obtaining biochar sorbents from modified wood for use in wastewater treatment processes from heavy metal ions (using the example of copper ions). The degree of purification of samples containing copper ions reaches 35% for modified birch wood and 18% for an oil-treated sample of biochar from pine wood: These indicators are comparable with the data on purification of a solution from  $\text{Cu}^{2+}$  with biochar sorbents from natural birch and pine wood. The study proposes approaches to the utilization of modified wood with the production of functional materials (bi-carbon sorbents), which makes it possible to create conditions for waste-free production, while reducing the anthropogenic load on the environment.

**Keywords:** wood, *Betula pendula* Roth, *Pinus sylvestris* L., hydrophobization, biochar, sorption, water resistance, contact angle

**Funding:** The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-23-00122, <https://rscf.ru/project/23-23-00122/>

**Acknowledgments:** the author thanks the reviewers for their contribution to the peer review of the article.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Tomina E. V., Dmitrenkov A. I., Nguyen Anh Tien, Zhuzhukin K. V., Khodosova N. A. (2024). Hydrophobization of *Betula pendula* Roth wood and *Pinus sylvestris* L. wood with waste vegetable oil and the possibility of its utilization in a biochar sorbent for copper ions. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 1 (53), pp. 190-202 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/11>.

**Received** 09.01.2024. **Revised** 01.02.2024. **Accepted** 12.02.2024. **Published online** 20.03.2024.

## Введение

Требования экологии в современном мире приветствуют использование возобновляемых ресурсов, таких как древесина. Интерес к древесине как природному функциональному, прежде всего, конструкционному, материалу неуклонно возрастает. Древесина представляет собой устойчивый и возобновляемый экологически безопасный материал, обладающий спектром высоких эксплуатационных характеристик. Древесина известна как один из наиболее распространенных материалов, используемых в строительстве, различных отраслях промышленности и в быту. По сравнению с существующими синтетическими материалами древесина обладает уникальными физико-механическими свойствами: эластичностью, прочностью, низкой плотностью и коэффициентом теплового расширения [1]. Так, сосна обыкновенная, на долю которой приходится около 19% всех хвойных лесов Российской Федерации при малой плотности (порядка 0,52 т/м<sup>3</sup>) характеризуется сопротивляемостью сжатию сравнимой с таковой для бетона класса В15, плотность которого выше практически в 5 раз (2,5 т/м<sup>3</sup>). Однако разрушительное воздействие на древесину многочисленных природных факторов (влаги, температура, свет) сильно снижает сроки эксплуатации древесины. Особенно активно эти процессы развиваются при эксплуатации древесины на открытых пространствах, что приводит к снижению прочности, водостойкости, изменению размеров, формы, веса, способствует биологической деструкции [1-3].

Поэтому актуальной представляется задача разработки новых технологий модифицирования натуральной древесины с целью улучшения ее физико-механических характеристик при одновременном возрастании срока эксплуатации.

Для модифицирования натуральной древесины используют самые разнообразные химические

вещества и составы. Пропитка термореактивными смолами (карбамидоформальдегидная, фенолоформальдегидная, меламиноформальдегидная) представляет собой эффективный метод образования полимерного защитного слоя в структуре клеточных стенок древесины [4-7]. Использование парафинов и восков для модификации древесины улучшает ее физико-механические характеристики, формоустойчивость, стойкость к грибковым заболеваниям [8-10]. Однако зачастую пропиточные композиции для защиты древесины характеризуются существенными недостатками: обладают токсичностью для человека и животных, резким запахом, изменяют цвет натуральной древесины, а также имеют ограниченный срок действия [11,12]. Натуральные масла обычно используются для пропитки древесины, чтобы улучшить ее внешний вид, защитить от влаги и повысить долговечность. Вот некоторые популярные натуральные масла, используемые для пропитки древесины.

Льняное масло, получаемое из семян льна, является традиционным выбором для пропитки древесины. Составы на его основе достаточно глубоко проникают в древесину, образуя защитный слой, который подчеркивает естественную красоту и текстуру древесины. Однако пропиточные составы включающие, льняное масло имеют некоторые недостатки: низкая скорость высыхания и потемнение древесины.

Тунговое масло, полученное из семян тунгового дерева, является еще одним популярным средством для пропитки древесины. Оно обеспечивает превосходную водостойкость и образует твердое и долговечное покрытие. Тунговое масло усиливает естественный цвет древесины и придает ей глянцевый вид.

Масло грецкого ореха получают из орехов грецких орехов. Это нетоксичный и экологически

чистый вариант пропитки древесины. Масло грецкого ореха обеспечивает прозрачную отделку, которая подчеркивает естественную красоту древесины и обеспечивает некоторую защиту от влаги.

Датское масло представляет собой смесь различных натуральных масел, включая льняное и тунговое масло. Он предназначен для проникновения в древесину и обеспечения долговечной отделки. Датское масло усиливает текстуру древесины и обеспечивает хорошую водостойкость.

Тиковое масло специально разработано для тикового дерева, которое состоит из смеси соевого, тунгового и льняного, но его можно использовать и для других пород дерева. Он обеспечивает отличную защиту от влаги, ультрафиолетовых лучей и плесени. Тиковое масло усиливает естественный цвет древесины и придает ей теплый, насыщенный оттенок.

При пропитке древесины отработанным растительным маслом может произойти несколько химических взаимодействий. Вот основные процессы, которые происходят:

1. Впитывание: древесина является пористым материалом и при контакте с отработанным растительным маслом впитывает масло за счет капиллярного действия. Масло проникает в волокна древесины и заполняет пустоты внутри материала.

2. Полимеризация. Отработанное растительное масло содержит триглицериды, состоящие из жирных кислот. Со временем эти жирные кислоты могут подвергаться реакции полимеризации в присутствии кислорода и тепла. Полимеризация приводит к образованию сшитой сети молекул, в результате чего внутри древесины образуется затвердевший и защитный слой.

3. Окисление. Отработанное растительное масло содержит ненасыщенные жирные кислоты, склонные к окислению. При воздействии воздуха эти ненасыщенные жирные кислоты реагируют с кислородом, что приводит к образованию свободных радикалов. Эти свободные радикалы могут инициировать цепную реакцию, приводящую к окислению масла и образованию различных соединений, таких как пероксиды и гидропероксиды. Окисление может способствовать закалке и отверждению пропитанной древесины.

4. Гидролиз: в присутствии влаги в пропитанной древесине может произойти гидролиз. Гидролиз — это химическая реакция, при которой молекулы воды расщепляют более крупные молекулы на более мелкие. Это может привести к разложению пропиточного масла и выделению жирных кислот и глицерина.

Взаимодействие с компонентами древесины. Отработанное растительное масло может взаимодействовать с различными компонентами древесины, такими как лигнин и целлюлоза. Эти взаимодействия могут изменить структуру древесины и повысить ее долговечность и устойчивость к гниению.

Важно отметить, что конкретные химические взаимодействия могут варьироваться в зависимости от состава отработанного растительного масла, типа древесины и используемого процесса пропитки.

Важное значение имеет и утилизация отходов производства. Одним из перспективных подходов представляется использование в качестве матрицы для разработки пропиточных защитных композиций для древесины отработанного фритюрного масла, прежде всего в силу его экологичности, доступности и дешевизны. Отработанное фритюрное масло в больших объемах образуется при приготовлении продуктов питания, и его запрещено сливать в канализацию. Масложировые отходы практически не растворимы в воде и легко осаждаются на поверхностях трубопроводов, вызывают механическую блокировку труб различными видами загрязнений и приводят к снижению эффективности работы очистных сооружений. Очистка и утилизация такого масла требует существенных затрат и дорогостоящего оборудования. Основным направлением переработки отработанного растительного масла является производство биологически чистого дизельного топлива. Согласно существующих стандартов отработанное растительное масло относится к малотоксичным отходам. Поэтому модифицирующие защитные композиции на основе такого масла будут удовлетворять требованиям экологической безопасности конструкций и изделий из древесины.

Эксплуатация модифицированной древесины подразумевает определенный срок службы, по окончании которого встает вопрос ее утилизации.

В связи с этим нами предлагается вторичное использование данного материала в качестве биоугля с высокими сорбционными характеристиками для извлечения ионов тяжелых металлов, в частности ионов  $\text{Cu}^{2+}$ .

Биоуголь привлекает все больший интерес исследователей благодаря своим обширным потенциальным применениям. Он находит свое применение в области экологического контроля, а также в областях связанных с уменьшением выбросов парниковых газов, рекультивацией и иммобилизацией тяжелых металлов, сохранением и обменом питательными веществами, связыванием углекислого газа и смягчением последствий изменения климата. Биоуголь обычно получают из различных видов сырья в условиях менее энергоемкого термического воздействия. Химическая активация первичного сырья и газификация в процессе термической конверсии требуются для получения различных типов углеродных соединений, однако они обычно не обязательны для производства биоугля. Биоуголь используется в качестве добавки к почве, адсорбента, топлива, носителя катализаторов или самого катализатора. Использование биоугля для очистки от тяжелых металлов и выброса загрязняющих веществ открыло новые горизонты в последние годы. Сорбционный метод очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов является наиболее востребованным вследствие его эффективности, экономичности и широкого круга используемых сорбентов [13,14]. Преимущества биоугля как сорбента заключается в его высокой устойчивости к деградации, развитой поверхности и ее значительном отрицательном заряде, что способствует сорбции положительно заряженных ионов тяжелых металлов [15].

Обработанные консервантами древесные отходы обладают значительным потенциалом для конверсии в ценные продукты с использованием процесса термохимической трансформации. Пиролиз является термохимическим конверсионным процессом, осуществляемым при температуре приблизительно 400-500°C в условиях ограниченного доступа к кислороду, что приводит к образованию биомасла в качестве основного жидкого продукта в сочетании с биоуглем и неконденсируемым газом [15]. Различные виды биомассы были использованы в качестве

сырья для биоугля, включая древесные, сельскохозяйственные, лесные, твердые бытовые и животные отходы [17]. Обработанные древесные материалы, были предложены как альтернативное сырье для биомасла и биоугля [13].

Поэтому целью данной работы являлось установление эффективности гидрофобизации древесины отработанным растительным маслом и тестирование биоугля из такой древесины в качестве углеродного сорбента ионов меди.

### Материалы и методы

#### *Предмет и объект исследований*

В качестве объектов исследования использовали образцы древесины березы и сосны стандартных размеров (20x20x10 длина, ширина, толщина) [17]. Помимо самого широкого распространения этих пород представлялось интересным выявление степени гидрофобизации отработанным фритюром древесины хвойных и лиственных пород в виду их различного строения и состава.

В качестве основы пропитывающего состава древесины применялось отработанное фритюрное рафинированное подсолнечное масло. Такое масло содержит полиненасыщенные жирные кислоты (ПНЖК), прежде всего, линолевую (20–70 %) и олеиновую (15–25 %), что способствует его легкой окисляемости в присутствии кислорода воздуха при нагревании (при 60 °C начинает окисляться линолевая кислота, а при 100 °C – олеиновая кислота). Термообработка приводит к росту содержания свободных жирных кислот, карбонильных и полярных соединений, снижению степени ненасыщенности [16].

#### *Сбор данных*

Модифицирование древесины березы и сосны отработанным фритюром проводили по методу «горяче-холодных ванн» согласно [17]. Для образцов измеряли количество введенного масла, показатели влаго- и водопоглощения, а также разбухания обработанной и необработанной древесины. Краевой угол смачивания поверхности древесины дистиллированной водой определяли методом лежащей капли с использованием программы HView 10.

Кинематическую вязкость исследуемого растительного масла определяли вискозиметром ВПЖ-3.

Биоугольные сорбенты на основе натуральной древесины сосны и березы, а также модифицированной отработанным фритюром древесины получали карбонизацией соответствующих образцов в течение 5 часов при температуре 400 °С в закрытом реакторе, скорость нагрева составляла 10 °С/мин. Изменения физико-химических свойств древесины в процессе пирогенетической переработки и формирование структуры угля начинается при температуре выше 200 °С, при этом происходят изменения в лигно-углеводном комплексе древесины, снижается степень полимеризации полисахаридов, особенно гемицеллюлоз, происходят изменения в структуре лигнина. При температуре выше 300 °С лигно-углеводная структура древесины полностью исчезает. При 400 °С получают турбостратную структуру угля при разложении природной структуры лигнина.

Анализ сорбционной способности биоуглей определяли по отношению к ионам меди (II). Сорбцию осуществляли в статических условиях ( $t=21^{\circ}\text{C}$ ), исходная концентрация ионов  $\text{Cu}^{2+}$  составила 0,15 моль/л. Для приготовления раствора сорбата  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  использовали колбы объемом 25,0 мл, содержащие расчетное количество рабочего раствора, 5,0 мл 5%-ного раствора аммиака и объем дистиллированной воды, необходимый для приготовления 25,0 мл. Метод основан на взаимодействии ионов меди (II) с аммиаком с образованием прочного, окрашенного в синий цвет, комплексного соединения. Интенсивность окраски пропорциональна концентрации ионов меди в растворе. Содержание ионов меди определяли фотокалориметрически с использованием прибора КФК-2, длина волны 660 нм. Образцы биоугля массой 0,2 г ( $\pm 0.0002$  г), выдерживали до установления равновесия в 20,0 мл раствора сульфата меди, после раствор фильтровали, в фильтрате определяли равновесную концентрацию ионов меди ( $C_p$ ) и рассчитывали равновесную сорбционную емкость:

$$A = \frac{(C_n - C_p) \cdot V}{m}, \quad (1)$$

где  $A$  – равновесная сорбционная емкость, ммоль/г,  $C_n$  – начальная концентрация раствора, моль/л,  $C_p$  – равновесная концентрация раствора, моль/л,  $V$  – объем раствора, л,  $m$  – масса образца, г.

### Анализ данных

Для каждого из экспериментов по определению водостойких показателей было использовано не менее 10 образцов. Анализ сорбционной емкости проводили пока точность результатов не отличалась менее чем на 5 %. Статистический анализ проводили с использованием VASSARSTAT (<http://vassarstats.net/anova1u.html>) для выполнения однофакторного дисперсионного анализа. Все данные выражены в средних значениях  $\pm(\text{CO}) \text{SE}$  (стандартное отклонение). Статистическая значимость определялась по сравнению с необработанной древесиной при  $p < 0,05$ .

### Результаты

Как следует из сравнения содержания отработанного растительного масла в модифицированных образцах древесины березы и сосны (рисунок 1), при одинаковых размерах образцов древесина березы поглощает отработанного растительного масла в два раза больше, чем древесина сосны, что может быть связано с различным строением и химическим составом древесины этих пород.

Тем не менее, увеличение краевого угла смачивания на  $19^{\circ}$  у березы и  $17^{\circ}$  у сосны (рис. 1), говорит о том, что на поверхности образцов древесины обеих пород формируется защитная полимерная пленка, препятствующая проникновению воды внутрь биополимера.

Введение отработанного растительного масла в пористые структуры древесины способствует гидрофобизации образцов березы и сосны. Влагопоглощение обработанной древесины березы после 1 суток испытаний уменьшилось в 3,5 раза, а водопоглощение – в 6 раз по сравнению с необработанной. У сосны водопоглощение было меньше в 2 раза, а влагопоглощение – в 1,6 раза по сравнению с натуральной древесиной (рис. 2). Для 30 суток испытаний эти показатели оказались несколько ниже: влагопоглощение обработанной березы было ниже в 1,5 раза, а водопоглощение – в 4 раза, чем у необработанной.

Показатели разбухания древесины березы, обработанной отходами растительного масла, уменьшились в 2,5 раза по сравнению с натуральной древесиной. В меньшей степени этот эффект проявляется для древесины сосны (рис. 2).



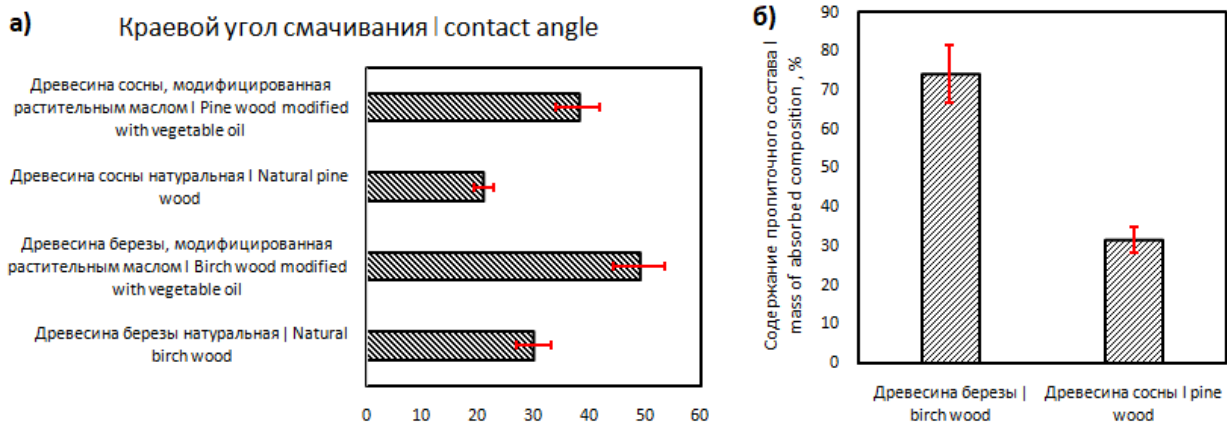


Рисунок 1. Содержание пропиточного состава (б) и краевого угла смачивания (а) для древесины березы и сосны

Figure 1. Content of impregnating composition and contact angle for birch and pine wood

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

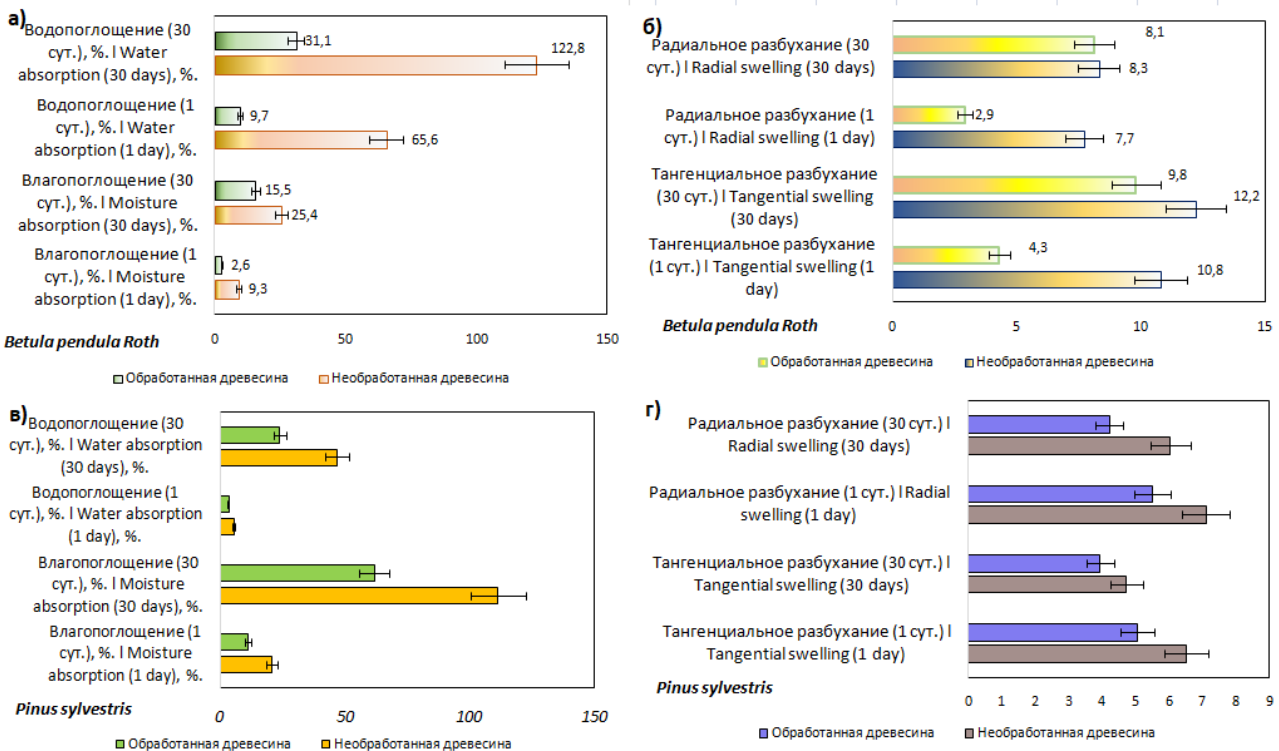


Рисунок 2. Показатели влагопоглощения, водопоглощения, разбухания в радиальном и тангенциальном (Е) направлениях древесины берёзы (а, б) и сосны (в, г) после 1 и 30 суток испытаний (%)

Figure 2. Indicators of moisture absorption, water absorption, swelling in the radial and tangential (E) directions of birch (a, b) and pine (c, d) wood after 1 and 30 days of testing (%)

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Пропитка отработанным фритюрным маслом практически не изменяет цвет природной древесины, цвет становится только более насыщенным и

ярким. Показано, что отработанное растительное масло по эффективности пропитки (количество вве-



денного масла) и защитным свойствам (гидрофобности, влаго- и водостойкости) не уступает, а в ряде случаев превосходит обычные растительные масла.

Представляется интересным оценить влияние модифицирования древесины отработанным растительным маслом на сорбционную активность полученных из нее биоуглей в отношении ионов тяжелых металлов на примере ионов  $\text{Cu}^{2+}$ . Изотермы сорбции ионов меди из водных растворов на образцах биоуглей из натуральной и модифицированной древесины представлены на рис. 3. Полученные кривые можно удовлетворительно описать уравнением изотермы адсорбции Ленгмюра. Сорбция ионов меди на образцах углей из природной древесины и углей на основе древесины, пропитанной отработанным раститель-

ным маслом, практически идентична с учетом статистической обработки экспериментальных данных. Можно отметить, что изотермы сорбции в области низких концентраций на всех угольных сорбентах совпадают. Кривая сорбции для образца биоугля, полученного на основе модифицированной древесины березы имеет пологую форму в диапазоне концентраций ионов  $\text{Cu}^{2+}$  0,01–0,03 моль/л. Интересно, что максимальная сорбционная емкость биоуглей из березы (как натуральной, так и модифицированной) при концентрации ионов меди 0,06 моль/л почти в 2 раза выше таковой для биоуглей из сосны.

Степень очистки проб, содержащих ионы меди достигает 35 % для модифицированной древесины березы и 18 % для обработанного маслом образца биоугля из древесины сосны.

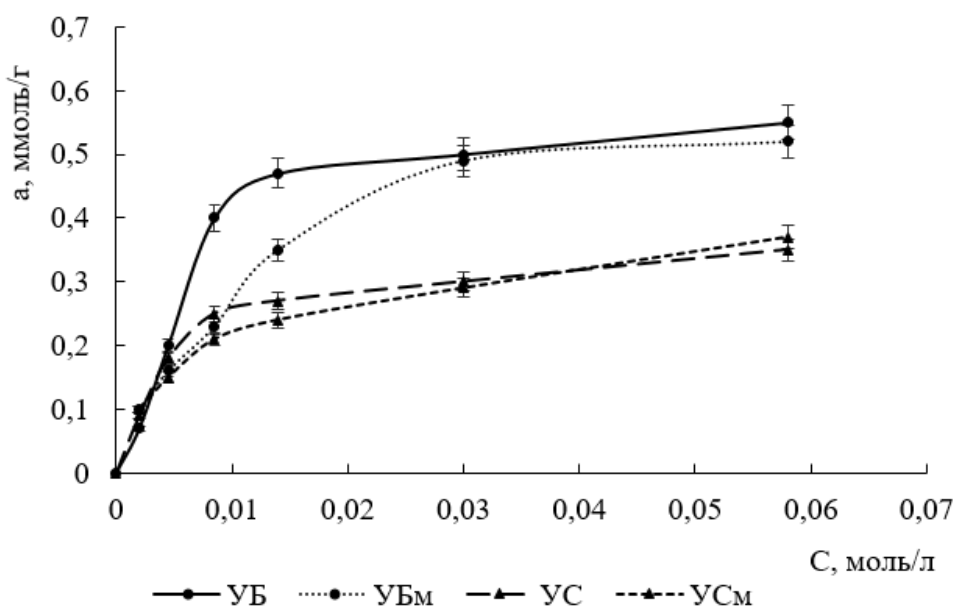


Рисунок 3. Изотермы сорбции ионов меди образцами биоуглей на основе необработанных опилок и опилок, после обработки отработанным растительным маслом. (УБ и УС - уголь из древесины березы и сосны, УБм и УСм – уголь из древесины березы и сосны, обработанной отработанным растительным маслом)  
 Figure 3. Sorption isotherms of copper ions by biochar samples based on untreated sawdust and sawdust after treatment with waste vegetable oil. (UB and US - coal from birch and pine wood, UBm and USM – coal from birch and pine wood treated with waste vegetable oil)

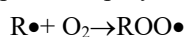
Источник: собственные вычисления авторов  
 Source: own calculations

Таким образом, установлена возможность получения биоуглей из модифицированной отработанным подсолнечным маслом древесины с высокой сорбционной активностью в отношении ионов  $\text{Cu}^{2+}$ . Переработка же гидрофобизированной древесины в

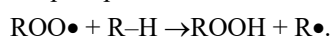
биоугли представляет собой перспективное направление утилизации изделий из пропитанной древесины с получением достаточно эффективного сорбционного материала.

### Обсуждение

Согласно [18], основными реакциями, протекающими при термической обработке растительного масла, в том числе и подсолнечного, являются окисление, гидролиз и полимеризация. К летучим продуктам окисления относятся углеводы, спирты, альдегиды, кетоны, сложные эфиры, а нелетучие продукты представлены моно- и диглицеридами, триацилглицеридами, димерами, тримерами полимерами триацилглицеридов, а также свободными жирными кислотами. Высокая температура при жарке, контакт с металлами, активные формы кислорода способствуют образованию в масле алкильных радикалов по окислительно-восстановительному механизму, которые при взаимодействии с кислородом образует пероксид-радикал [19, 20]:



Далее происходит взаимодействие этого радикала с другой ненасыщенной кислотой или ее ацилом R-H с образованием нового свободного радикала и гидропероксида:



С накоплением гидропероксидов и продуктов их распада скорость реакции резко увеличивается и возникают новые радикалы:



Большое количество радикалов способствует протеканию процесса радикальной полимеризации с образованием моно-, ди- и полимеров, содержащих гидропероксиды, эпоксидные, гидроксильные и карбонильные группы, а также связи -COC- и -COOC-. Вследствие высокого содержания линолевой кислоты в подсолнечном масле, в нем легче протекают процессы полимеризации во время многократной термообработки.

Большое количество кислородсодержащих функциональных групп в отработанном растительном масле приводит к возникновению системы водородных связей с OH-группами структурных компонентов древесины. В образовании водородных связей, относящихся к донорно-акцепторным связям, кроме OH-групп могут принимать участие в качестве доноров электронной пары атомы кислорода пиранозного или фуранозного циклов и гликозидной связи, тогда как в качестве акцепторов высту-

пают атомы водорода гидроксильных и карбоксильных групп продуктов термообработки растительного масла. Поскольку модифицирование древесины маслом проходит при высоких температурах методом «горяче-холодных» ванн, нельзя исключать образование и эфирных связей между компонентами древесины и отработанного растительного масла, прежде всего свободными жирными кислотами. Такая система связей значительно снижает проникновение воды в древесину, поскольку образование водородных связей с энергией порядка 25 кДж/моль между цепями целлюлозы и молекулами воды является одной из причин высокой гигроскопичности древесины. Значительное повышение гидрофобности модифицированной древесины связано с тем, что центры образования водородной связи с молекулами воды уже участвуют в образовании H-связей с составляющими отработанного подсолнечного масла. Гидрофобизация древесины березы выражена в большей степени в сравнении с древесиной сосны вследствие комплекса причин: различного строения древесины этих пород, большего содержания в лигнине лиственных метоксильных групп и, следовательно, атомов кислорода, большего содержания гемицеллюлоз и преобладания пентозанов в древесине березы, высокой смолистости древесины сосны.

Биоуголь, полученный пиролизом различных древесных материалов, является эффективным сорбентом как токсикантов органической природы, так и ионов тяжелых металлов [21].

Согласно [22] адсорбция ионов металлов на поверхности сорбентов обусловлена в основном комплексобразованием между ионами металлов и поверхностными функциональными группами сорбента с образованием связи Me-O, а удельная поверхность и пористость сорбента играют второстепенную роль. Ранее нами установлено [21, 23], что в образцах биоуглей, полученных из натуральной древесины березы, содержание атомов кислорода выше (в среднем 23 ат%), чем в биоугле из натуральной сосны (в среднем 16 ат%), что указывает на большее количество кислородсодержащих функциональных групп в березовом биоугле, выступающих в качестве активных центров сорбции ионов меди.

### Заключение

Установлено, что модифицирование древесины березы и сосны отработанным подсолнечным маслом приводит к значительному повышению гидрофобности биополимерных материалов. Влапоглощение древесины березы после обработки уменьшилось в 3,5 раза, а водопоглощение снизилось в 6 раз, тогда как для древесины сосны водопоглощение уменьшается в 2 раза, а влапоглощение – в 1,6 раза ( $p < 0,05$ ). Выявлена высокая степень межфазного взаимодействия между древесиной обеих пород и отработанным растительным маслом, характеризуемая значениями краевого угла смачивания  $24 \pm 3,1$  и  $30 \pm 3,9$  ( $p < 0,05$ ).

Показана возможность получения биоугольных сорбентов из модифицированной древесины для использования в процессах очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов (на примере ионов меди). Установлена достаточно высокая степень очистки раствора от  $\text{Cu}^{2+}$  (для березы и сосны). Предложены подходы к утилизации модифицированной древесины с получением функциональных материалов (биоугольных сорбентов), что позволяет создать условия для безотходного производства, снижая при этом антропогенную нагрузку на окружающую среду.

### Список литературы

1. Varganici C. D., Rosu L., Rosu D. et al. Sustainable wood coatings made of epoxidized vegetable oils for ultraviolet protection // *Environ Chem Lett*. 2021. Vol. 19. pp. 307-328. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01067-w>.
2. Лоскутов С. Р. и др. Гигроскопические свойства древесины лиственных пород // *Лесной вестник [Forestry bulletin]*. – 2022. – Т. 26. – № 2. – С. 92-102.
2. Ning L. et al. How does surfactant affect the hydrophobicity of wax-coated wood? // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2022. – Т. 650. – С. 129606. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129606>
3. Wang Z. et al. Characterization of wood cell walls treated by high-intensity microwaves: Effects on physicochemical structures and micromechanical properties // *Industrial Crops and Products*. – 2022. – Т. 187. – С. 115341. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115341>
4. Исследование межфазного взаимодействия древесины березы с пропиточным составом / К. В. Жужукин, Л. И. Бельчинская, Е. В. Томина, А. Н. Зяблов, В. Х. Йен, А. С. Чуйков // *Лесотехнический журнал*. – 2023. – Т. 13. – № 1 (49). – С. 209–221. - Библиогр.: с. 218-220 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/14>.
5. Li Z. et al. Curing characteristics of low molecular weight melamine-urea-formaldehyde (MUF) resin-impregnated poplar wood // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Т. 325. – С. 126814. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126814>.
6. Altgen M. et al. Chemical imaging to reveal the resin distribution in impregnation-treated wood at different spatial scales // *Materials & Design*. – 2023. – Т. 225. – С. 111481. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111481>
7. Dorich A. et al. Recent developments in the performance of micro/nanoparticle-modified urea-formaldehyde resins used as wood-based composite binders: A review // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. – 2022. – Т. 114. – С. 103106. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103106>.
8. Boneka A. S. et al. Sorption isotherm and physico-mechanical properties of kedondong (*Canarium spp.*) wood treated with phenolic resin // *Construction and Building Materials*. – 2021. – Т. 288. – С. 123060. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123060>.
9. Wang W., Ran Y., Wang J. Improved performance of thermally modified wood via impregnation with carnauba wax/organoclay emulsion // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Т. 247. – С. 118586. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118586>.

10. Bao M. et al. Changes in Chemical Composition, Crystallizability, and Microstructure of Decayed Wood-Fiber-Mat-Reinforced Composite Treated with Copper Triazole Preservative // *Forests*. – 2022. – Т. 13. – №. 9. – С. 1387. <https://doi.org/10.3390/f13091387>.
11. Rabajczyk A., Zielecka M., Małozieć D. Hazards resulting from the burning wood impregnated with selected chemical compounds // *Applied Sciences*. – 2020. – Т. 10. – №. 17. – С. 6093. <https://doi.org/10.3390/app10176093>.
12. Shen X. et al. Water vapor sorption mechanism of furfurylated wood // *Journal of Materials Science*. – 2021. – Т. 56. – С. 11324-11334. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06041-7>.
13. Tan X., Liu Y., Zeng G., Wang X., Hu X., Gu Y., Yang Z. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. *Chemosphere*. 2015; 125: 70-85. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.12.058.
14. Bashir A. et al. Removal of heavy metal ions from aqueous system by ion-exchange and biosorption methods // *Environmental Chemistry Letters*. – 2019. – Т. 17. – С. 729-754. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-00828-y>.
15. Zheng H. et al. Biochar for water and soil remediation: Production, characterization, and application // *A New Paradigm for Environmental Chemistry and Toxicology: From Concepts to Insights*. – 2020. – С. 153-196. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-9447-8\\_11](https://doi.org/10.1007/978-981-13-9447-8_11).
16. Сергеева А. С., Вострикова Н. Л., Медведевских М. Ю. Разработка комплекса метрологического обеспечения пищевой промышленности // *Эталоны. Стандартные образцы*. – 2021. – № 1. – С. 21-33.
17. Dmitrenkov A. I., Nikulin S. S., Nikulina N. S., Borovskaya A. M., Nedzelsky E. A. (2020) Study of the process of impregnating wood birches spent vegetable oil. *Forest Journal* 10(2) 161 doi: 10.34220 / issn .2222-7962/2020.2/16.
18. Серба Е. М. и др. Усовершенствование методики определения липазы, основанной на методе получения жирных кислот, в ферментных препаратах для пищевой промышленности // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. – 2023. – Т. 13. – № 1 (44). – С. 57-66.
19. Жерносек А. В., Струкова М. Н. Влияние предприятий мясной промышленности на окружающую среду // *Система управления экологической безопасностью*. – Екатеринбург, 2021. – С. 105-112.
20. Скурыдин Ю. Г., Скурыдина Е. М. Сравнительная оценка влияния факторов физического воздействия на молекулярную подвижность и степень кристалличности древесины березы // *Системы. Методы. Технологии*. – 2020. – №. 4. – С. 119-126.
21. Vedenyapina M. D., Kurmysheva A. Yu., Kulaishin S. A., Kryazhev Yu. G. Adsorption of some heavy metals on activated carbons (review). *Chemistry of solid fuel*. 2021; 2: 18-41. DOI: 10.31857/S0023117721020092. EDN: UOOLVP.
22. Томина, Е. В. Сорбционно-поверхностные характеристики модифицированного биоугля, полученного при карбонизации опилок сосны / Е. В. Томина, Н. А. Ходосова, А. Н. Лукин // *Сорбционные и хроматографические процессы*. – 2022. – Т. 22, № 4. – С. 442-452. – DOI 10.17308/sorpchrom.2022.22/10600. – EDN HGRUCJ.

### References

1. Varganici C. D., Rosu L., Rosu D. et al. Sustainable wood coatings made of epoxidized vegetable oils for ultraviolet protection // *Environ Chem Lett*. 2021. Vol. 19. pp. 307-328. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01067-w>.
2. Loskutov S. R. et al. Gigroskopicheskie svojstva drevesiny` listvenny`x porod // *Forestry bulletin*. – 2022. – Т. 26. – №. 2. – С. 92-102.
2. Ning L. et al. How does surfactant affect the hydrophobicity of wax-coated wood? // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2022. – Т. 650. – С. 129606. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129606>.
3. Wang Z. et al. Characterization of wood cell walls treated by high-intensity microwaves: Effects on physicochemical structures and micromechanical properties // *Industrial Crops and Products*. – 2022. – Т. 187. – С. 115341. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115341>.

4. Issledovanie mezhfaznogo vzaimodejstviya drevesiny` berezy` s propitochny`m sostavom / K. V. Zhuzhukin, L. I. Bel`chinskaya, E. V. Tomina, A. N. Zyablov, V. X. Jen, A. S. Chujkov // *Lesotekhnicheskij zhurnal*. - 2023. - T. 13. - № 1 (49). - S. 209-221. - Bibliogr.: s. 218-220 (21 nazv.). - DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/14>.
5. Li Z. et al. Curing characteristics of low molecular weight melamine-urea-formaldehyde (MUF) resin-impregnated poplar wood // *Construction and Building Materials*. - 2022. - T. 325. - S. 126814. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126814>.
6. Altgen M. et al. Chemical imaging to reveal the resin distribution in impregnation-treated wood at different spatial scales // *Materials & Design*. - 2023. - T. 225. - S. 111481. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111481>.
7. Dorich A. et al. Recent developments in the performance of micro/nanoparticle-modified urea-formaldehyde resins used as wood-based composite binders: A review // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. - 2022. - T. 114. - S. 103106. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103106>.
8. Boneka A. S. et al. Sorption isotherm and physico-mechanical properties of kedondong (*Canarium spp.*) wood treated with phenolic resin // *Construction and Building Materials*. - 2021. - T. 288. - S. 123060. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123060>.
9. Wang W., Ran Y., Wang J. Improved performance of thermally modified wood via impregnation with carnauba wax/organoclay emulsion // *Construction and Building Materials*. - 2020. - T. 247. - S. 118586. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118586>.
10. Bao M. et al. Changes in Chemical Composition, Crystallizability, and Microstructure of Decayed Wood-Fiber-Mat-Reinforced Composite Treated with Copper Triazole Preservative // *Forests*. - 2022. - T. 13. - № 9. - S. 1387. <https://doi.org/10.3390/f13091387>.
11. Rabajczyk A., Zielecka M., Małozieć D. Hazards resulting from the burning wood impregnated with selected chemical compounds // *Applied Sciences*. - 2020. - T. 10. - № 17. - S. 6093. <https://doi.org/10.3390/app10176093>.
12. Shen X. et al. Water vapor sorption mechanism of furfurylated wood // *Journal of Materials Science*. - 2021. - T. 56. - S. 11324-11334. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06041-7>.
13. Tan X., Liu Y., Zeng G., Wang X., Hu X., Gu Y., Yang Z. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. *Chemosphere*. 2015; 125: 70-85. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.12.058.
14. Bashir A. et al. Removal of heavy metal ions from aqueous system by ion-exchange and biosorption methods // *Environmental Chemistry Letters*. - 2019. - T. 17. - S. 729-754. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-00828-y>.
15. Zheng H. et al. Biochar for water and soil remediation: Production, characterization, and application // *A New Paradigm for Environmental Chemistry and Toxicology: From Concepts to Insights*. - 2020. - S. 153-196. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-9447-8\\_11](https://doi.org/10.1007/978-981-13-9447-8_11).
16. Sergeeva A. S., Vostrikova N. L., Medvedevskix M. Yu. Razrabotka kompleksa metrologicheskogo obespecheniya pishhevoj promy`shlennosti // *E`talony`. Standartny`e obrazcy*. - 2021. - № 1. - S. 21-33.
17. Dmitrenkov A I, Nikulin S S, Nikulina N S, Borovskaya A M and Nedzelsky E A 2020 Study of the process of impregnating wood birches spent vegetable oil. *Forest Journal* 10(2) 161 doi: 10.34220 / issn .2222-7962/2020.2/16.
18. Serba E. M. i dr. Uovershenstvovanie metodiki opredeleniya lipazy`, osnovannoj na metode polucheniya zhirny`x kislot, v fermentny`x preparatax dlya pishhevoj promy`shlennosti // *Izvestiya vuzov. Prikladnaya ximiya i biotekhnologiya*. - 2023. - T. 13. - № 1 (44). - S. 57-66.
19. Zhernosek A. V., Strukova M. N. Vliyanie predpriyatij myasnoj promy`shlennosti na okruzhayushhuyu sredu // *Sistema upravleniya e`kologicheskoy bezopasnost`yu*. - Ekaterinburg, 2021. - 2021. - S. 105-112.
20. Skury`din Yu. G., Skury`dina E. M. Sravnitel`naya ocenka vliyaniya faktorov fizicheskogo vozdejstviya na molekulyarnuyu podvizhnost` i stepen` kristallichnosti drevesiny` berezy` // *Sistemy`. Metody`. Tekhnologii*. - 2020. - № 4. - S. 119-126.
21. Vedenyapina M. D., Kurmysheva A. Yu., Kulaisin S. A., Kryazhev Yu. G. Adsorption of some heavy metals on activated carbons (review). *Chemistry of solid fuel*. 2021; 2: 18-41. DOI: 10.31857/S0023117721020092. EDN: UOOLVP.

22. Tomina, E. V. Sorbcionno-poverxnostny`e karakteristiki modifitsirovannogo biouglya, poluchennogo pri karbonizatsii opilok sosny` / E. V. Tomina, N. A. Xodosova, A. N. Lukin // Sorbcionny`e i xromatograficheskie processy`. – 2022. – Т. 22, № 4. – С. 442-452. – DOI 10.17308/sorpchrom.2022.22/10600. – EDN HGRUCJ.

### Сведения об авторах

*Томина Елена Викторовна* – доктор химических наук, зав. кафедрой химии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, e-mail: tomina-e-v@yandex.ru.

*Дмитренков Александр Иванович* – кандидат технических наук, доц. кафедры химии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, e-mail: dmitrenkov2109@mail.ru.

*Нгуен Ань Тьен* – кандидат химических наук, доцент, заведующий кафедрой неорганической химии, Педагогический университет Хошимина, ул. Ан Зьонг-Вьонг, 280, округ 4, район 5, Хошимин, Вьетнам; e-mail: tienna@hcmue.edu.vn. ORCIDiD: 0000-0002-4396-0349.

*Жужужкин Константин Викторович* – преподаватель кафедры химии, м.н.с. НИИ ИТЛК Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, e-mail: kinkon18@yandex.ru.

*Ходосова Наталья Анатольевна* – кандидат химических наук, доц. кафедры химии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, e-mail: nhodosova@mail.ru.

### Information about the authors

*Elena V. Tomina* – Doctor of Chemical Sciences, Head. Department of Chemistry, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, st. Timiryazev, 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, e-mail: tomina-e-v@yandex.ru.

*Alexander I. Dmitrenkov* – Candidate of Technical Sciences, Assoc. Department of Chemistry, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, st. Timiryazev, 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, e-mail: dmitrenkov2109@mail.ru.

*Nguyen Anh Tien* – PhD, Associate Professor, Head of the Department of Inorganic Chemistry, Ho Chi Minh City University of Education, 278 An Duong Vuong St., Ward 4, District 5, Ho Chi Minh City, Vietnam e-mail: tienna@hcmue.edu.vn. ORCID iD: 0000-0002-4396-0349.

*Konstantin V. Zhuzhukin* – Lecturer, Department of Chemistry, Junior Researcher NII ITLC Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, st. Timiryazev, 8, Voronezh, Russian Federation, 394087; e-mail: kinkon18@yandex.ru.

*Natalia A. Khodosova* – Candidate of Chemical Sciences, Assoc. Department of Chemistry, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, st. Timiryazev, 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, e-mail: nhodosova@mail.ru.

✉ – Для контактов | Corresponding author


Оригинальная статья


DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/12>


УДК 676.02/.05



## Роль предгидролизного размола при получении микрокристаллической целлюлозы: на примере образцов биоповрежденной древесины *Picea abies*, *Larix sibirica* и *Populus tremula*

Лариса В. Юртаева ✉, 2052727@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0002-6045-3442>

Юрий Д. Алашкевич, alashkevichud@sibsau.ru  <https://orcid.org/0009-0005-9894-2630>

Евгений В. Каплёв, kaplyov2017@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0005-0235-7630>

Владимир А. Патраков, Patrakov\_vo03@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0003-4673-0367>

Ева Р. Колосова, eva.kolosova@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0004-6863-7822>

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, 660037, Российская Федерация

Способность размалывающего оборудования при производстве микрокристаллической целлюлозы (МКЦ) разделять растительные полимеры на волокна, измельчать и развивать у них определенные свойства можно использовать в случае невозможности минимизировать концентрацию кислоты. Для получения микрокристаллической целлюлозы использовались образцы ( $N = 6$ ) сухостойной древесины *Picea abies* (L.) H.KARST., *Larix sibirica* LEDEB., *Populus tremula* L. Варка образцов проводилась в лабораторном автоклаве, предгидролизный размол – в центробежном размалывающем аппарате при концентрации волокнистой массы 6 % и варьировании степени помола от 15 до 85 градусов Шоппер Риглера (°ШР). Химическая обработка образцов целлюлозы при разной степени помола проводилась при варьировании температуры гидролиза от 80 до 100 °С, концентрации соляной кислоты от 54.75 до 91.25 г/л, времени гидролитической деструкции от 60 до 120 мин. Зависимости степени полимеризации ( $R^2 = 0.93$ ) и степени кристалличности ( $R^2 = 0.99$ ) от этих факторов аппроксимированы уравнениями регрессии второго порядка и визуализированы в виде трехмерных поверхностей отклика. Оптимальные значения переменных факторов гидролиза: концентрация соляной кислоты – 54.75 г/л, время гидролитической деструкции – 60 мин, температура гидролиза – 80 °С, степень помола – 85 °ШР. Наибольшее влияние на количественные значения степени полимеризации и степени кристалличности оказывает степень помола волокнистой массы, наименьшее – температура гидролиза. С увеличением степени помола значительное, в 2,7 раза, снижение степени полимеризации происходит у образцов МКЦ из древесины *P. abies* и *P. tremula*. Увеличение показателей степени кристалличности (17%) и насыпной плотности (20 %) в большей степени наблюдается у образцов МКЦ из древесины *P. abies* и *L. sibirica*. Использование предгидролизного размола целлюлозы в процессе получения МКЦ позволяет сократить расходы на проведение химической обработки в 1,7 раза.

**Ключевые слова:** микрокристаллическая целлюлоза, *Picea abies* (L.) H.KARST., *Larix sibirica* LEDEB., *Populus tremula* L., предгидролизный размол, степень полимеризации, степень кристалличности

**Финансирование:** данное исследование не получало внешнего финансирования.

**Благодарности:** авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.


**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Роль предгидролизного размола при получении микрокристаллической целлюлозы: на примере образцов биоповрежденной древесины *Picea abies*, *Larix sibirica* и *Populus tremula* / Л. В. Юртаева, Ю. Д. Алашкевич, Е. В. Каплёв, В. А. Патраков, Е. Р. Колосова // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 14. – № 1 (53). – С. 203–218. – Библиогр.: с. 212–217 (33 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/12>.

Поступила 17.11.2023. Пересмотрена 13.12.2023. Принята 19.12.2023. Опубликована онлайн 20.03.2024.

Article

### The role of prehydrolysis refining in obtaining microcrystalline cellulose: case of biodamage wood from *Picea abies*, *Larix sibirica* and *Populus tremula* species

Larisa V. Yurtaeva ✉, 2052727@mail.ru,  <https://orcid.org/0009-0002-6045-3442>

Yuri D. Alashkevich, alashkevichud@sibsau.ru  <https://orcid.org/0009-0005-9894-2630>

Eugene V. Kaplyov, kaplyov2017@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0005-0235-7630>

Vladimir A. Patrakov, Patrakov\_vo03@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0003-4673-0367>

Eva R. Kolosova, eva.kolosova@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0004-6863-7822>

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 660037, Krasnoyarsk, Russian Federation

#### Abstract

The ability of grinding equipment in the production of microcrystalline cellulose (MCC) to separate plant polymers into fibers, grind and develop certain properties in them can be used if it is impossible to minimize the concentration of acid. To obtain microcrystalline cellulose, samples (N = 6) of dry wood *Picea abies* (L.) H.KARST., *Larix sibirica* LEDEB., *Populus tremula* L. species were used. The samples were cooked in a laboratory autoclave, prehydrolysis grinding was carried out in a centrifugal grinding machine at a fibrous mass concentration of 6% and varying the degree of grinding from 15 to 85 degrees of Schopper Riegler (°SR). Chemical treatment of cellulose samples with different degrees of grinding was carried out with varying hydrolysis temperatures from 80 to 100 °C, hydrochloric acid concentrations from 54.75 to 91.25 g/l, and hydrolytic degradation time from 60 to 120 minutes. The dependences of the degree of polymerization ( $R^2 = 0.93$ ) and the degree of crystallinity ( $R^2 = 0.99$ ) on these factors are approximated by second-order regression equations and visualized as three-dimensional response surfaces. The optimal values of the hydrolysis variables are: hydrochloric acid concentration – 54.75 g/l, hydrolytic degradation time – 60 min, hydrolysis temperature – 80 °C, grinding degree – 85 °C. The degree of grinding of the fibrous mass has the greatest influence on the quantitative values of the degree of polymerization and the degree of crystallinity, the lowest is the temperature of hydrolysis. With an increase in the degree of grinding, a significant 2.7-fold decrease in the degree of polymerization occurs in MCC samples from *P. abies* and *P. tremula* wood. An increase in the degree of crystallinity (17%) and bulk density (20%) is observed to a greater extent in MCC samples from *P. abies* and *L. sibirica* wood. The use of prehydrolysis milling of cellulose in the process of obtaining MCC reduces the cost of chemical treatment by 1.7 times.

**Keywords:** microcrystalline cellulose, *Picea abies* (L.) H.KARST., *Larix sibirica* LEDEB., *Populus tremula* L., prehydrolysis refining, degree of polymerization, degree of crystallinity

**Funding:** this research received no external funding.

**Acknowledgments:** authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.



**For citation:** Yurtaeva L. V., Alashkevich Yu. D., Kaplyov E. V., Patrakov V. A., Kolosova E. R. (2023). The role of prehydrolysis refining in obtaining microcrystalline cellulose: case of biodamage wood from *Picea abies*, *Larix sibirica* and *Populus tremula* species. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 1 (53), pp. 203-218 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/12>.

**Received** 17.11.2023. **Revised** 13.12.2023. **Accepted** 19.12.2023. **Published online** 20.03.2024.

### Введение

В настоящее время перспективным направлением развития целлюлозно-бумажной промышленности является производство микрокристаллической целлюлозы (МКЦ). В связи с растущим спросом на альтернативные виды сырья взамен невозобновляемым и дефицитным ископаемым материалам, благодаря своей возобновляемости, нетоксичности, экономической ценности, способности к биологическому разложению, высоким механическим свойствам, биосовместимости микрокристаллическая целлюлоза широко применяется в виде добавки в различных отраслях промышленности и в производстве полимерных композитов. Для удовлетворения растущего спроса на производство новых типов материалов на основе МКЦ в промышленных масштабах и снижения энергоемкости производства, разрабатываются новые способы ее получения.

Растительные полимеры являются дешевым, доступным, возобновляемым сырьем и идеально подходят для использования во многих отраслях промышленности, таких как целлюлозно-бумажная, строительная, мебельная, фармакологическая, химическая и др. Они обладают высоким соотношением прочности и веса, некоррозионной природой, высокой вязкостью разрушения, возобновляемостью и устойчивостью, что дает им уникальные преимущества перед другими материалами [1].

Целлюлоза является самым распространенным биополимером в природе, который содержится не только в деревьях хвойных и лиственных пород, но и недревесных (однолетних) растениях, отходах сельскохозяйственных культур и другой биомассе. Она состоит из полидисперсных линейных полимерных цепей, которые образуют надмолекулярные структуры с водородными связями. Благодаря этой структуре она нерастворима в воде и большинстве обычных органических жидкостей. Свойства цел-

люлозы и ее способность вступать в реакцию с другими веществами зависят от химического строения и от физической структуры целлюлозы (формы макромолекул, межмолекулярного взаимодействия, надмолекулярной структуры) [2-4].

Это обстоятельство предопределяет повышенный интерес исследователей к применению модифицированной целлюлозы (порошковых целлюлозных материалов) в различных отраслях промышленности. Виды порошковых целлюлозных материалов (ПЦМ): порошковая (ПЦ)/ powdered cellulose (PC), микрокристаллическая (МКЦ)/ microcrystalline cellulose (MCC), микрофибриллярная целлюлоза (МФЦ)/microfibrillated cellulose (MFC), нанокристаллическая (НКЦ)/nanocrystalline cellulose (CNC), нанофибриллярная (НФЦ)/nanofibrillated cellulose (NFC). Установлено, что ПЦМ отличаются высокой прочностью, сверхпластичностью, способны изменять свойства материалов, придавая им качественно и количественно новые характеристики [5-8]. В результате меняются свойства исходного материала [9]. Отличительными особенностями ПЦМ являются строение и размер частиц, степень полимеризации (СП), степень кристалличности (СК).

Наибольший спрос МКЦ наблюдается в фармацевтической, химической, косметической, пищевой промышленности, например в качестве модификаторов реологии, пищевых ингредиентов (загустителей, стабилизаторов эмульсий), фармацевтических препаратов (в качестве вспомогательного средства для таблетирования), хроматографии [10-14].

МКЦ - деполимеризованный очищенный целлюлозный продукт, получаемый из альфа-целлюлозы с использованием минеральных кислот (серной, соляной, азотной и др.). Степень полимеризации находится в диапазоне 100...400; степень кристалличности 0,63...0,90; размер частиц 1... 400 мкм [15-19].

Кроме традиционного способа получения МКЦ существуют и другие способы: паровой взрыв (автогидролиз-взрыв), ультразвуковая обработка, с использованием заморозки при помощи жидкого азота, с экструзионным воздействием [20-23]. Значения выходных параметров МКЦ позволяют оценить дальнейшую пригодность ее в производстве и подобрать условия для переработки.

При предгидролизном размоле происходят структурные изменения волокна: внешнее и внутреннее фибриллирование, укорочение волокна, скручиваемость и высвобождение химических компонентов [28-30].

Анализ литературных данных показал, что несмотря на увеличивающийся спрос использования МКЦ, в настоящее время не существует единой технологии, обеспечивающей промышленный способ ее получения для химической отрасли. Это связано с тем, что все они имеют существенные недостатки как с технологической и с экономической точек зрения, так и с точки зрения экологичности и управляемости процессами производства [24, 25]. Поэтому разработка экологически безопасной, энерго- и ресурсосберегающей технологии производства МКЦ, включающей операции ножевого, так и безножевого размола полуфабрикатов [26, 27] является актуальной.

Цель работы – экспериментально на установке инерционного типа [31, 32] осуществить поиск оптимальных значений факторов предгидролизного размола, влияющих на показатели эффективности процесса – степень полимеризации (СП) и степень кристалличности (СК) макромолекул целлюлозы при разной степени помола образцов из биоповрежденной древесины *Picea abies* (L.) H.KARST., *Larix sibirica* LEDEB. и *Populus tremula* L.

### Материалы и методы

#### Объект и предмет исследования

Объект исследования – процесс получения МКЦ. Предмет исследования – процесс предгидролизного размола волокнистой массы в технологии получения МКЦ.

#### Дизайн исследования

В качестве сырья выступали целлюлозы, полученные из древесины хвойных пород (ели обыкновенной, *Picea abies* (L.) H.KARST.; лиственницы

сибирской, *Larix sibirica* LEDEB.), поврежденные в 2017 году сибирским шелкопрядом, уссурийским полиграфом, и из древесины лиственной породы (осины, *Populus tremula* L.), поврежденной грибом. Отбор сырья проводился в апреле 2022 года на территории Енисейского района Красноярского края. Содержание остаточного лигнина в целлюлозе, выделенной из биоповрежденной ели – 3,9 %, из биоповрежденной лиственницы – 4,3 %, из биоповрежденной осины – 2,21 %; альфа-целлюлозы – 83-87 %, степень повреждения древесины – 20-25%.

Для контроля процесса размола волокнистой массы и качества образцов МКЦ, полученной из биоповрежденной древесины использовали следующие лабораторные методы:

- определение массовой доли лигнина в целлюлозе по ГОСТ 11960;
- массовую долю альфа-целлюлозы определяли по ГОСТ 6840;
- измерение степени помола в °ШР проводили в соответствии с ISO 5267-1;
- среднюю длину волокна определяли на приборе для измерения показателя средней длины волокон бумажной массы СДВ-Т (Россия);
- определение внешней удельной поверхности целлюлозы по методу Е. Я. Винецкой с помощью фотоэлектрического колориметра КФК-2УХЛ4.2;
- определение степени полимеризации проводилось в соответствии с ГОСТ 9105.
- определение параметров микроструктуры образцов с помощью микроскопа.

Получение целлюлозы из биоповрежденной древесины осуществлялось варочным раствором, основными компонентами которого являлись гидроксид и сульфид натрия (NaOH и Na<sub>2</sub>S). Варка проводилась в лабораторном автоклаве при максимальной температуре 170 °С в течение 3 часов, жидкостном модуле – 4,8, степень сульфидности варочного раствора – 18%. Промывку и сортирование целлюлозы проводили в лабораторной ссече. Выход целлюлозы после варки составил 41-43 %.

Размол волокнистой массы (15...85 °ШР) концентрацией 6 % с одновременной отбелкой гипохлоритом натрия при гидромодуле 1:18 проводилась в установке с инерционными телами (ЦРА)

[33], при частоте вращения инерционных тел 228 мин<sup>-1</sup>, угле установки ножей на инерционном теле относительно оси 0°, угле наклона ножей в разномольном барабане 35°.

После размола образцы целлюлозы (15...85 °ШР) сухостью 93...98 % подвергали гетерогенному гидролизу (химической обработке). Интервалы варьирования: температура  $t = 80...100$  °С, концентрация соляной кислоты 54,75...91,25 г/л, время 60...120 мин. Для определения степени полимеризации целлюлозы после гидролиза применяли комплексное соединение гексанатрий тристаратр железа.

Гидролизованную целлюлозу подвергали диспергированию на мельнице марки VLM-2 (Рос-

сия) до мелкодисперсного состояния. Индекс кристалличности микрокристаллической целлюлозы установлен на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3. Излучение Сука, сканирование 1 град/мин, шаг сканирования 0,02 град.

Размеры полученных образцов МКЦ измеряли на сканирующем микроскопе высокого разрешения Hitachi SU3500 (ускоряющее напряжение – 0,3 - 30 кВ, детектор – вторичных и обратно рассеянных электронов).

### Анализ данных

Для математической обработки результатов использовали пакет программ Statistica (планирование экспериментов, регрессионный и дисперсионный анализы) (табл. 1, 2).

Таблица 1

Нормализация параметров полнофакторного эксперимента по поиску оптимальных факторов предгидролизного размола, влияющих на показатели эффективности процесса получения МКЦ – степень полимеризации (СП) и степень кристалличности (СК) макромолекул целлюлозы – при разной степени помола образцов из биоповрежденной древесины

Table 1

Normalization of the parameters of a full-factor experiment to search for optimal prehydrolysis grinding factors affecting the efficiency of the MCC production process – the degree of polymerization (DP) and the degree of crystallinity (DC) of cellulose macromolecules – at different degrees of grinding of samples from bio-damaged wood

Параметр   Parameter	Обозначение   Designation	
	натуральное   natural	нормализованное   normalized
Входные параметры (управляемые факторы)   Input parameters (controlled factors)		
Концентрация кислоты, г/л   Acid concentration, g/l	c	X <sub>1</sub>
Температура, °С   Temperature, °C	t	X <sub>2</sub>
Длительность гидролиза, мин   Duration of hydrolysis, min	τ	X <sub>3</sub>
Степень помола, °ШР   The degree of refining, °SR	°ШР	X <sub>4</sub>
Выходные параметры (контролируемые факторы)   Output parameters (controlled factors)		
Степень полимеризации   Degree of polymerization	СП	Y <sub>1</sub>
Степень кристалличности, %   Degree of crystallinity	СК	Y <sub>2</sub>

Таблица 2

Уровни и интервалы варьирования исследуемых факторов

Table 2

Levels and intervals of variation of the studied factors

Фактор   Factor	Обозначение   Designation		Интервал варьирования фактора   The interval of variation of the factor	Уровень варьирования фактора   The level of variation of the factor		
	Натуральное   Natural	Нормализованное   Normalized		-1	0	+1
Концентрация кислоты, г/л   Acid concentration, g/l	c	X <sub>1</sub>	18,25	54,75	73	91,25

## Деревопереработка. Химические технологии

Фактор   Factor	Обозначение   Designation		Интервал варьирования фактора   The interval of variation of the factor	Уровень варьирования фактора   The level of variation of the factor		
	Натуральное   Natural	Нормализованное   Normalized		-1	0	+1
Температура, °С   Temperature, °C	t	X <sub>2</sub>	10	80	90	100
Длительность гидролиза, мин   Duration of hydrolysis, min	τ	X <sub>3</sub>	30	60	90	120
Степень помола, °ШП   The degree of refining, °SR	°ШП	X <sub>4</sub>	35	15	50	85

### Результаты

Гидролиз целлюлозы соляной кислотой проводили до предельной степени полимеризации по наиболее приемлемым режимам. Предварительно

было изучено изменение размеров волокон целлюлозы до и после предгидролизного размола волокнистой массы в ЦРА, полученной из различного вида сырья (табл. 3).

Таблица 3

Экспериментальные данные предгидролизного размола целлюлозы

Table 3

Experimental data of prehydrolysis refining of cellulose mass

Породы древесины   Type of wood	Лигнин, %   Lignin, %	Альфа-целлюлоза, %   Alpha Cellulose, %	Средняя длина волокна, мм   Average fiber length, mm	Внешняя удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г   External specific gravity surface, m <sup>2</sup> /g
до размола (15 °ШП)   before refining (15 °SR)				
Ель   Fir	3,9	85,5	2,83	13433
Лиственница   Larch	4,3	83,4	2,57	14168
Осина   Aspen	2,21	85,0	1,08	11897
после размола (85 °ШП)   after refining (85 °SR)				
Ель   Fir	3,46	85,5	1,37	16974
Лиственница   Larch	3,60	83,4	1,43	17056
Осина   Aspen	1,82	85,0	0,49	13970

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: own calculations

Анализ полученных данных показывает, что с увеличением степени помола происходит снижение остаточного количества лигнина в целлюлозе, длины волокна и увеличение внешней удельной поверхности волокна. Изменение этих показателей интенсивнее происходит у осины: снижение длины волокна - на 55%, увеличение внешней удельной поверхности - в 1,6 раз и количества мелочи - на 4,8%.

Менее интенсивно у лиственницы: длины волокна - 44%, внешней удельной поверхности - 1,2 раза, мелочи - 1,2%.

Для удаления аморфной части и получения микрокристаллической целлюлозы, образцы целлюлозы (ели, лиственницы и осины) со степенью помола 15 °ШП, 35 °ШП, 55 °ШП, 85 °ШП подвергали обработке соляной кислотой.

Для определения приемлемых условий проведения процесса гидролитической деструкции целлюлозы, выделенной из биоповрежденной древесины при жидкостном модуле 1:15 в ходе эксперимента варьировали четыре фактора:  $X_1$  – концентрация кислоты (диапазон варьирования 54,75–91,25 г/л),  $X_2$  – температура (диапазон варьирования 80–100 °С),  $X_3$  – продолжительность гидролиза (60–120 мин),  $X_4$  – степень помола (15–85 °ШР). Результаты этой серии опытов характеризовали двумя выходными параметрами:  $Y_1$  – степень полимеризации,  $Y_2$  – степень кристалличности, %. Четырехфакторный план эксперимента по каждому виду сырья составил 81 режим проведения процесса гидролиза. Задача оптимизации сформулирована следующим образом: в пределах изученной области факторного пространства  $54,75 \leq X_1 \leq 91,25$ ,  $80 \leq X_2 \leq 100$ ,  $60 \leq X_3 \leq 120$ ,  $15 \leq X_4 \leq 85$  вычислить какой из факторов оказывает наибольшее влияние на количественные значения  $Y_1$ ,  $Y_2$ .

В результате линейные уравнения регрессии (на примере *P. abies*) для определения влияния входных факторов ( $X_1$ , г/л,  $X_2$ , °С,  $X_3$ , мин,  $X_4$ , °ШР) на степень:

- полимеризации имеет вид

$$Y_1 = 1108,03 - 5,92 \cdot X_1 - 3,04 \cdot X_2 - 5,32 \cdot X_3 - 9,31 \cdot X_4 - 0,0055 \cdot X_1^2 + 0,028 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,014003 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,036 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,014 \cdot X_2^2 + 0,014 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,025 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,0042 \cdot X_3^2 + 0,027 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0,0079 \cdot X_4^2 \quad (1)$$

- кристалличности имеет вид

$$Y_2 = 67,57 + 0,095 \cdot X_1 - 0,042 \cdot X_2 + 0,045 \cdot X_3 + 0,063 \cdot X_4 - 0,00019 \cdot X_1^2 - 0,00046 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,00006 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,00027 \cdot X_1 \cdot X_4 + 0,00059 \cdot X_2^2 - 0,00018 \cdot X_2 \cdot X_3 -$$

$$0,00017 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0,000039 \cdot X_3^2 - 0,00019 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0,000006 \cdot X_4^2 \quad (2)$$

Значения выходных параметров МКЦ при планировании эксперимента с образцами биоповрежденной древесины *P. abies*, *L. sibirica* и *P. tremula* представлены в таблице 4, а поверхность отклика СП и СК, зависящая от технологических режимов предгидролизного размола – на рис. 1 и 2.

Уравнения (1) и (2) с достаточной степенью точности аппроксимируют искомые зависимости. Величина коэффициента детерминации составила для уравнений: степени полимеризации 0,93; степени кристалличности 0,98 (уровень значимости  $p < 0,05$ ), что указывает на достоверность коэффициентов полученных уравнений.

### Обсуждение

Из уравнений (1) и (2) следует, что при гидролизе целлюлозы наибольшее влияние на степень полимеризации и степень кристалличности оказывает степень помола волокнистой массы, наименьшее – температура.

Достаточно заметное влияние на СК и СП при получении МКЦ, так же, как и при получении порошковой целлюлозы [7], оказывают технологические режимы предгидролизного размола, определяемые концентрацией кислоты, температурой, длительностью и степенью размола. По разработанным режимам были получены образцы МКЦ (см. табл. 4), полученные в наиболее эффективных условиях проведения гидролиза: концентрация соляной кислоты 54,75 г/л, время гидролитической деструкции 60 мин, температура 80 °С, степень помола 85 °ШР.

Таблица 4

Значения выходных параметров МКЦ

Table 4

Values of MCC output parameters

Породы древесины   Type of wood	Выход, %   Exit, %	Насыпная плотность, г/мл   Bulk density, g/ml	СП   Degree of polymerization	СК   Degree of crystallinity
до размола (15 °ШР)   before refining (15 °SR)				
Ель   Fir	97,0	0,303	275	0,65
Лиственница   Larch	97,0	0,305	280	0,65
Осина   Aspen	95,0	0,325	230	0,63
после размола (85 °ШР)   after refining (85 °SR)				
Ель   Fir	96,0	0,380	100	0,78
Лиственница   Larch	96,0	0,377	124	0,75

Породы древесины   Type of wood	Выход, %   Exit, %	Насыпная плотность, г/мл   Bulk density, g/ml	СП   Degree of polymerization	СК   Degree of crystallinity
Осина   Aspen	94,0	0,370	87	0,80
Avicel стандарт FAO UN MCC 460 i   Avicel standard FAO UN MCC 460 i	-	0,280-0,360	265	0,63-0,82

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

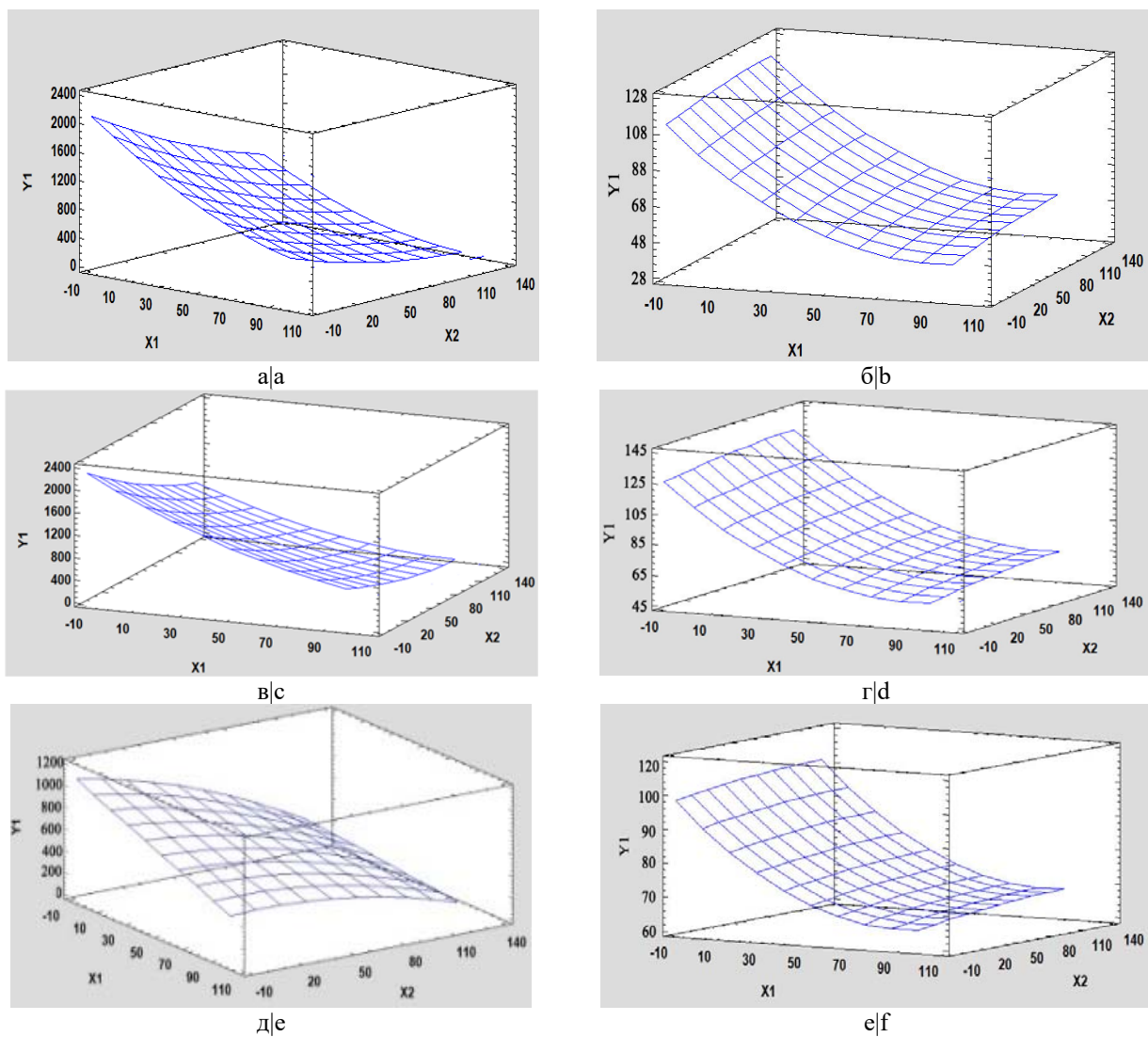


Рисунок 1. Поверхности отклика СП от температуры и продолжительности гидролиза:

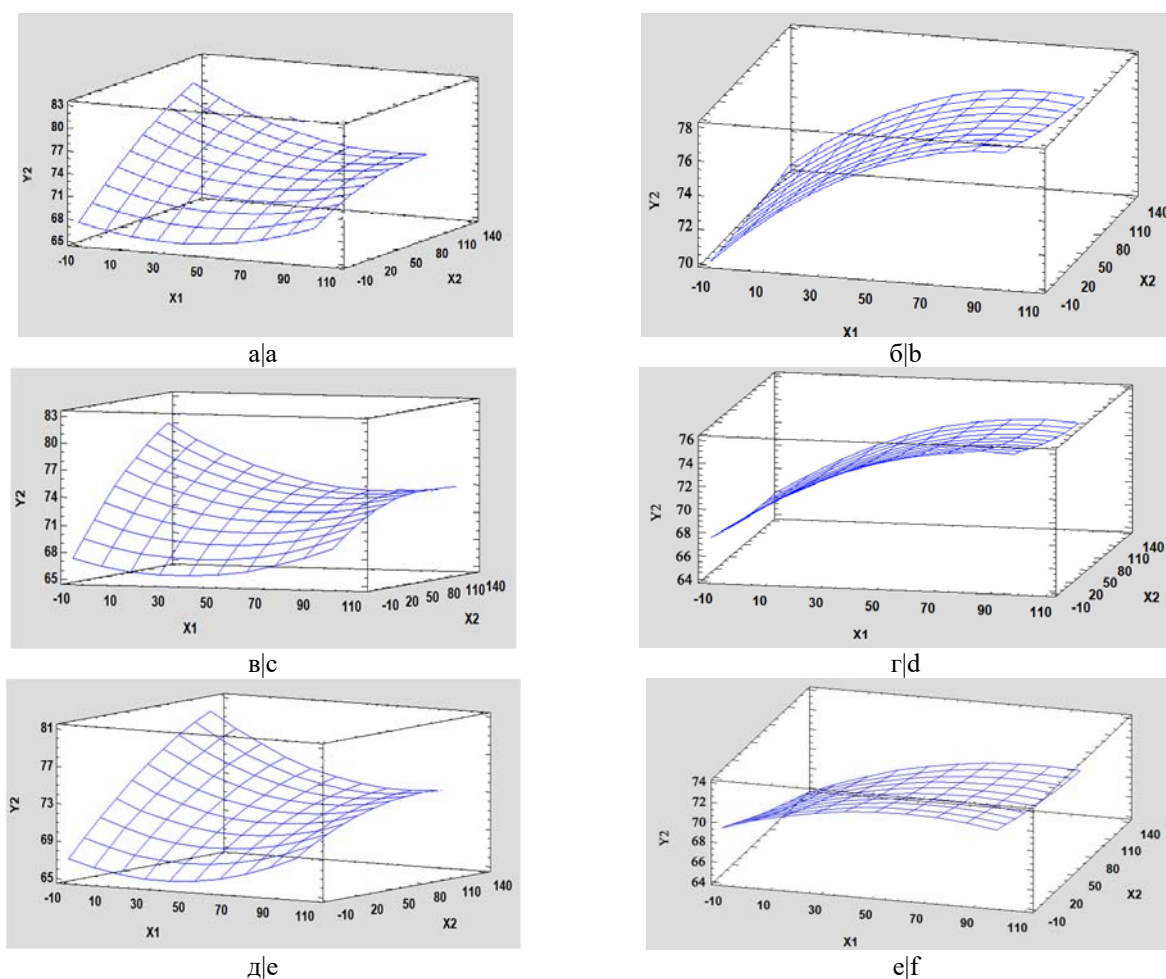
ель а – 15 °ШР, б - 85 °ШР; лиственница в – 15 °ШР, г - 85 °ШР; осина д – 15 °ШР, е - 85 °ШР

Figure 1. Response surfaces of the degree of polymerization on the temperature and duration of hydrolysis:

fir а – 15 °SR, б - 85 °SR; larch в – 15 °SR, г - 85 °SR; aspen д – 15 °SR, е - 85 °SR

Источник: собственные композиции авторов

Source: the author's composition



ель а – 15 °ШР, б - 85 °ШР; лиственница в – 15 °ШР, г - 85 °ШР; осина д – 15 °ШР, е - 85 °ШР;  
 Рисунок 2. Поверхности отклика СК от температуры и продолжительности гидролиза:  
 ель а – 15 °ШР, б - 85 °ШР; лиственница в – 15 °ШР, г - 85 °ШР; осина д – 15 °ШР, е - 85 °ШР;  
 fir а – 15 °SR, b - 85 °SR; larch в – 15 °SR, d - 85 °SR; aspen е – 15 °SR, f - 85 °SR

Figure 2. Response surfaces of the degree of crystallinity on the temperature and duration of hydrolysis

Источник: собственные вычисления автора

Source: the author's composition

Полученные уравнения регрессии для СП (1) и СК (2) позволяют спрогнозировать степень полимеризации и кристалличности при выбранных технологических параметрах проведения химической обработки целлюлозы. Включение предгидролизного размола в процесс получения микрокристаллической целлюлозы сократит расходы на проведение химической обработки волокнистой массы (концентрация кислоты, время обработки и температура проведения гидролиза) в 1,7 раза.

В дальнейшем планируется исследовать физико-механические свойства и остаточную деформацию после сжатия у водонефтенабухающих резин

при включении в их состав МКЦ с разной степенью полимеризации.

### Заключение

Биоповрежденная древесина является полноценным сырьем для получения микрокристаллической целлюлозы.

С увеличением степени помола до 83 °ШР, независимо от вида целлюлозы, степень полимеризации микрокристаллической целлюлозы снижается: у образцов биоповрежденной древесины ели обыкновенной (*P. abies*) – в 2,8 раза; лиственницы сибирской (*L. sibirica*) – в 2,3 раза; осины (*P. tremula*)

– 2,6 раза, степень кристалличности повышается соответственно - на 17, 14 и 22 % соответственно, что положительно сказывается на качественных показателях МКЦ.

Образцы биоповрежденной древесины *P. tremula*, подвергнутые для выработки МКЦ предгидролизному размолу на установке инерционного типа, демонстрируют наименьшую степень полимеризации по сравнению с образцами биоповрежденной древесины *P. abies* и *L. Sibirica*.

После размола волокнистой массы в ЦРА до 83 °ШР количественные изменения бумагообразующих показателей происходят наиболее интенсивнее у образцов из биоповрежденной древесины осины (*P. tremula*): длина волокна снижается на 55 %, внешняя удельная поверхность и доля мелочи увеличиваются соответственно в 1,6 раза и на 4,8 %.

### Список литературы

1. Биоразлагаемые материалы на основе растительных полисахаридов для упаковки пищевых продуктов. Часть 1 / И. Ю. Потороко, А. В. Малинин, А. В. Цатуров, Удей Багале // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2020; № 2: С. 21-28. – DOI: <http://doi.org/10.14529/food200203>. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42951866>.
2. Вшивков, С. А. Реологические свойства жидкокристаллических растворов производных целлюлозы / С. А. Вшивков, Е. В. Русинова, А. С. А. Салех // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2021; № 4: С. 243-248. – DOI 10.31857/S2308112021040088. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45795102>.
3. Tan W. Y., Gopinath S. C. B., Anbu P., Velusamy P., Gunny A. A. N., Chen Y., Subramaniam S. Generation of microcrystalline cellulose from cotton waste and its properties // BioResources. 2023; 8(3): 4884-4896. DOI: <http://doi.org/10.15376/biores.18.3.4884-4896>.
4. García Hernández M. A., Marure A. L., Neira Velázquez M. G., Mariano Torres J. A., Galvan A. A. Microcrystalline cellulose isolation – Proposed mechanism: Enhanced coupling // BioResources. 2023; 18(1): 1788-1802. DOI: <http://doi.org/10.15376/biores.18.1.1788-1802>.
5. Мартакова, Ю. В. Гидрогели на основе растительных целлюлоз и их композиты с наночастицами серебра : дис. ... канд. хим. наук : 02.00.06 / Мартакова Юлия Владимировна. – Ин-т высокомолекуляр. соединений. - Сыктывкар, 2018. - 153 с. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54451226>.
6. Момзякова, К. С. Совершенствование технологии получения целлюлозы из травянистых растений : дис. ... канд. техн. наук: 05.17.06 / Момзякова Ксения Сергеевна. – Казань, 2021. – 150 с. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54419808>.
7. Влияние ножевого способа размола волокнистой массы на процесс получения порошковой целлюлозы / Ю. Д. Алашкевич, Л. В. Юртаева, Н. С. Решетова, Р. А. Марченко // Химия растительного сырья. 2020; № 4: С. 493-499. – DOI: <http://doi.org/10.14258/jcprm.2020048121>. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/vmyzac>.
8. Переработка поврежденной древесины как фактор рационального использования природных ресурсов / Е. Р. Колосова, В. А. Патраков, Е. В. Каплев, Д. С. Таразеев // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с Международным участием), Красноярск, 21–22 апреля 2022 года. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2022; 194-196. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49759509>.
9. Малова, А. С. Использование порошковых целлюлозных материалов в производстве бумаги и картона / А. С. Малова, В. Н. Сунайт // Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения : Материалы II Международной научно-технической конференции молодых учёных и специалистов ЦБП, Санкт-Петербург, 23 ноября 2020 года. Том I. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2020; 46-51. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46185815>.



10. Queiroz A. L. P., Kerins B. M., Yadav J. et al. Investigating microcrystalline cellulose crystallinity using Raman spectroscopy. *Cellulose*. 2021; № 28: 8971–8985. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04093-1>.
11. Hermawan, D., Lai, T. K., Jafarzadeh, S. J., Gopakumar, D. A., Hasan, M., Owolabi, F. A. T., Sri Aprilia, N. A., Rizal, S., and Abdul Khalil, H. P. S. Development of seaweed-based bamboo microcrystalline cellulose films intended for sustainable food packaging applications. *BioRes.* 2019; 14 (2): 3389-3410. DOI: <http://doi.org/10.15376/biores.14.2.3389-3410>.
12. Hou, W., Ling, C., Shi, S., and Yan, Z. Preparation and characterization of microcrystalline cellulose from waste cotton fabrics by using phosphotungstic acid // *Int. J. Biol. Macromol.* 2019; № 123: 363-368. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.112>.
13. Kale, R. D., Bansal, P. S., and Gorade, V. G. Extraction of microcrystalline cellulose from cotton sliver and its comparison with commercial microcrystalline cellulose, *J. Polym. Environ.* 2018; № 26: 355-364. DOI: <http://doi.org/10.1007/S10924-017-0936-2>.
14. Болтовский, В. С. Способы получения микрокристаллической целлюлозы / В. С. Болтовский // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. 2021; № 1(241): С. 40-50. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44888935>.
15. Топтунов, Е. А., Севастьянова, Ю. В. Порошковые целлюлозные материалы: обзор, классификация, характеристики и области применения // *Химия растительного сырья*. 2021; № 4: С. 31-45. DOI: <http://doi.org/10.14258/jcprm.2021049186>. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47446186>.
16. Vanhatalo, K. A new manufacturing process for microcrystalline cellulose (MCC): A doctoral dissertation for the degree of Doctor of Science (Technology). Helsinki, 2019. 73 p. DOI: <http://doi.org/10.1134/S1070427209030276>.
17. Barud, H, Silva R, Barud H, Tercjak A, Guttierrez J, Lustri W, et al. A multipurpose natural and renewable polymer in medical applications: Bacterial cellulose. *Carbohydrate Polymers*. 2018; № 153: 406-420. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.07.059>.
18. Piyas, R.A., Sapuan S.M., Ishak M.R., Zainudin E.S., Atikah M.S. Characterization of sugar palm nanocellulose and its potential for reinforcement with a starch-based composite. In: *Sugar Palm Biofibers, Biopolymers, and Biocomposites*. 1st ed. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis Group; 2018; №1: pp. 189-220. DOI: <http://doi.org/10.1201/9780429443923-10>.
19. Делигнификация растительного сырья под воздействием микроволнового излучения. Ик-спектры и индексы упорядоченности целлюлозы / Е. Ю. Кушнир, А. Г. Шахова, Н. Г. Базарнова [и др.] // *Химия растительного сырья*. 2020; № 4: С. 101-107. – DOI: <http://doi.org/10.14258/jcprm.2020048962>. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44529529>.
20. Получение микрокристаллической целлюлозы из древесины осины под воздействием микроволнового излучения / Т. С. Геньш, Е. Ю. Кушнир, П. В. Колосов, К. В. Геньш // *Мой выбор - наука! : сборник материалов VI Региональной молодежной конференции, XLVI научной конференции студентов, магистрантов, аспирантов и учащихся лицейных классов, Барнаул, 17–27 апреля 2019 года.* – Барнаул: Алтайский государственный университет. 2020; С. 1256-1261. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43841476>.
21. Получение гидролизованной целлюлозы из древесины осины и сосны под воздействием микроволнового излучения / Е. Ю. Кушнир, Н. Г. Базарнова, Т. С. Геньш, К. В. Геньш // *Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья : Матер. VIII Всерос. конференции с международным участием, Барнаул, 05–09 октября 2020 года / под ред. Н. Г. Базарновой, В. И. Маркина.* – Барнаул: Алтайский государственный университет. 2020; С. 43-45. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44188333>.
22. Сравнительные исследования физико-химических свойств и структуры хлопковой целлюлозы и ее модифицированных форм / А. А. Атаханов, Б. Мамадиеров, М. Кузиева [и др.] // *Химия растительного сырья*. 2019; № 3: С. 5-13. – DOI: <http://doi.org/10.14258/jcprm.2019034554>. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41311613>.
23. Патент № 2804640 С2 Российская Федерация, МПК С08В 15/02. Способ непрерывного получения микрокристаллической целлюлозы : № 2022106827 : заявл. 15.03.2022 : опубл. 03.10.2023 / А. И. Сизов,

А. А. Добровольский, А. В. Мухамедшин, С. Д. Пименов ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Кристалл". – 7 с. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54674742>.

24. Получение порошковой микрокристаллической целлюлозы из древесной целлюлозы и исследование ее свойств / О. А. Носкова, Ф. Х. Хакимова, Р. Р. Хакимов, Е. А. Катаев // Наука и технологии: модернизация, инновации, прогресс : Сборник научных трудов по материалам X Международной научно-практической конференции, Анапа, 27 декабря 2022 года. – Анапа: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский центр экономических и социальных процессов» в Южном Федеральном округе. 2022; С. 62-67. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50338313>.

25. Каплев, Е. В. Способы получения порошковых целлюлозных материалов / Е. В. Каплев, Л. В. Юртаева // Состояние окружающей среды, проблемы экологии и пути их решения : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Усть-Илимск, 20–21 декабря 2021 года. – Иркутск: Байкальский государственный университет. 2022; с. 79-85. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48215448>.

26. Влияние ножевого и безножевого способов размола на волокнистый материал / А. В. Гончаров, О. Н. Федорова, Р. А. Марченко, Ю. Д. Алашкевич // Лесной и химический комплексы - проблемы и решения : Сборник матер. по итогам Всерос. науч.-практ. конференции, Красноярск, 02–04 сентября 2019 года. – Красноярск, 2019. – С. 315-317. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41219738>.

27. Марченко, Р. А. Безножевая обработка вторичного волокнистого сырья в ЦБП / Р. А. Марченко, В. И. Шуркина, А. А. Муравицкая // Решетневские чтения : Материалы XXIII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. В 2-х частях, Красноярск, 11–15 ноября 2019 года / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова. Ч. 2. – Красноярск, 2019. – С. 98-99. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41824511>.

28. Получение аналитической зависимости прочностных свойств бумаги от бумагообразующих показателей волокнистой массы / Л. В. Юртаева, Н. С. Решетова, Ю. Д. Алашкевич [и др.] // Химия растительного сырья. 2020; № 4: с. 501-509. – DOI: <http://doi.org/10.14258/jcprgm.2020048583>. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44529573>.

29. Каплев, Е. В. Влияние режима размола на физико-механические свойства сульфатной беленой целлюлозы / Е. В. Каплев, Л. В. Юртаева, Ю. Д. Алашкевич // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов : Матер. V Междунар. науч.-техн. конференции, посвященной памяти профессора В.И. Комарова, Архангельск, 11–14 сентября 2019 года. – Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова. 2019; с. 87-92. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42408660>.

30. Размол лиственной целлюлозы с использованием гарнитуры с криволинейной формой ножей / Е. М. Батракевич, В. И. Шуркина, Р. А. Марченко, Н. Е. Шумарина // Решетневские чтения : Материалы XXV Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. В 2-х частях, Красноярск, 10–12 ноября 2021 года / Под общей редакцией Ю.Ю. Логинова. Ч. 2. – Красноярск, 2021. – С. 88-89. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47712294>.

31. Воронин, И. А. Механизм размола на ножевом центробежно-размалывающем аппарате / И. А. Воронин, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов // Химия растительного сырья. 2020; № 4: С. 485-492. – DOI: <http://doi.org/10.14258/jcprgm.2020048164>. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44529571>.

32. Влияние размола однолетних растительных полимеров на процесс получения мелкодисперсной целлюлозы / Л. В. Юртаева, Ю. Д. Алашкевич, Е. В. Каплев, Е. А. Слизилова // Хвойные бореальной зоны. 2023; № 4: 361-368. – DOI: <http://doi.org/10.53374/1993-0135-2023-4-361-368>. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54398267>.

33. Патент № 2803626 С1 Российская Федерация, МПК D21C 1/04. Способ получения микрокристаллической целлюлозы : № 2023103933 : заявл. 20.02.2023 : опубл. 18.09.2023 / Ю. Д. Алашкевич, В. И. Ковалев, Л. В. Юртаева, Е. В. Каплёв, Е. А. Слизилова; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва". – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54659924>.

### References

1. Biodegradable materials based on plant polysaccharides for food packaging. Part 1 / I. Y. Potoroko, A. V. Malinin, A. V. Tsaturov, Uday Bakale // *Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*. 2020; No. 2: pp. 21-28. – DOI: <http://doi.org/10.14529/food200203>. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42951866>.
2. Vshivkov, S. A. Rheological properties of liquid crystalline solutions of cellulose derivatives / S. A. Vshivkov, E. V. Rusinova, A. S. A. Salekh // *High molecular weight compounds. Series A*. 2021; No. 4: pp. 243-248. – DOI 10.31857/S2308112021040088. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45795102>.
3. Tan W. Y., Gopinath S. C. B., Anbu P., Velusamy P., Gunny A. A. N., Chen Y., Subramaniam S. Generation of microcrystalline cellulose from cotton waste and its properties // *BioResources*. 2023; 8(3): 4884-4896. DOI: <http://doi.org/10.15376/biores.18.3.4884-4896>.
4. García Hernández M. A., Marure A. L., Neira Velázquez M. G., Mariano Torres J. A., Galvan A. A. Microcrystalline cellulose isolation – Proposed mechanism: Enhanced coupling // *BioResources*. 2023; 18(1): 1788-1802. DOI: <http://doi.org/10.15376/biores.18.1.1788-1802>.
5. Martakova, Yu. V. Hydrogels based on plant celluloses and their composites with silver nanoparticles : dis. ... candidate of Chemical Sciences : 02.00.06 / Martakova Julia Vladimirovna. – In-t high molecular weight. connections. Syktyvkar, 2018. - 153 p. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54451226>.
6. Momzyakova, K. S. Improving the technology of obtaining cellulose from herbaceous plants : Dis. ... candidate of Technical Sciences: 05.17.06 / Momzyakova Ksenia Sergeevna. - Kazan, 2021. - 150 p. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54419808>.
7. The influence of the knife method of grinding fibrous mass on the process of obtaining powdered cellulose / Yu. D. Alashkevich, L. V. Yurtayeva, N. S. Reshetova, R. A. Marchenko // *Chemistry of vegetable raw materials*. 2020; No. 4: Pp. 493-499. – DOI 10.14258/jcprm.2020048121.
8. Processing of damaged wood as a factor of rational use of natural resources / E. R. Kolosova, V. A. Patrakov, E. V. Kaplev, D. S. Tarazeev // *Young scientists in solving urgent problems of science : a collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists (with International participation)*, Krasnoyarsk, April 21-22, 2022. Krasnoyarsk, 2022; pp.194-196. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49759509>.
9. Malova, A. S. The use of powdered cellulose materials in the production of paper and cardboard / A. S. Malova, V. N. Sunait // *Modern pulp and paper industry. Current tasks and promising solutions : Materials of the II International Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists of the Central Bank, St. Petersburg, November 23, 2020. Vol. I.* – St. Petersburg : St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 2020; pp. 46-51. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46185815>.
10. Queiroz A. L. P., Kerins B. M., Yadav J. et al. Investigating microcrystalline cellulose crystallinity using Raman spectroscopy. *Cellulose*. 2021; № 28: 8971–8985. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04093-1>.
11. Hermawan D., Lai T. K., Jafarzadeh S. J., Gopakumar D. A., Hasan M., Owolabi F. A. T., Sri Aprilia N. A., Rizal S., Abdul Khalil H. P. S. Development of seaweed-based bamboo microcrystalline cellulose films intended for sustainable food packaging applications *BioRes*. 2019; 14 (2): 3389-3410. DOI: <http://doi.org/10.15376/biores.14.2.3389-3410>.
12. Hou W., Ling C., Shi S., Yan Z. Preparation and characterization of microcrystalline cellulose from waste cotton fabrics by using phosphotungstic acid // *Int. J. Biol. Macromol*. 2019; № 123: 363-368. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.112>.
13. Kale R. D., Bansal P. S., Gorade V. G. Extraction of microcrystalline cellulose from cotton sliver and its comparison with commercial microcrystalline cellulose, *J. Polym. Environ*. 2018; № 26: 355-364. DOI: <http://doi.org/10.1007/S10924-017-0936-2>.
14. Boltovsky V. S. Methods of obtaining microcrystalline cellulose / V. S. Boltovsky // *Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical technologies, biotechnology, geocology*. 2021; No. 1(241): pp. 40-50. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44888935>.

15. Toptunov, E. A., Sevastyanova, Yu. V. Powdered cellulose materials: review, classification, characteristics and applications // Chemistry of vegetable raw materials. 2021; No. 4: pp. 31-45. DOI: <http://doi.org/10.14258/jcprm.2021049186>. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47446186>.
16. Vanhatalo, K. A new manufacturing process for microcrystalline cellulose (MCC): A doctoral dissertation for the degree of Doctor of Science (Technology). Helsinki, 2019. 73 pp. DOI: <http://doi.org/10.1134/S1070427209030276>.
17. Barud, H, Silva R, Barud H, Tercjak A, Gutierrez J, Lustri W, et al. A multipurpose natural and renewable polymer in medical applications: Bacterial cellulose. Carbohydrate Polymers. 2018; № 153: 406-420. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.07.059>.
18. Ilyas, R.A., Sapuan S.M., Ishak M.R., Zainudin E.S., Atikah M.S. Characterization of sugar palm nanocellulose and its potential for reinforcement with a starch-based composite. In: Sugar Palm Biofibers, Biopolymers, and Biocomposites. 1st ed. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis Group; 2018; №1: pp. 189-220. DOI: <http://doi.org/10.1201/9780429443923-10>.
19. Delignification of plant raw materials under the influence of microwave radiation. IR spectra and indices of cellulose ordering / E. Y. Kushnir, A. G. Shakhova, N. G. Bazarnova [et al.] // Chemistry of vegetable raw materials. 2020; No. 4: pp. 101-107. – DOI: <http://doi.org/10.14258/jcprm.2020048962>. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44529529>.
20. Production of microcrystalline cellulose from aspen wood under the influence of microwave radiation / T. S. Gensh, E. Y. Kushnir, P. V. Kolosov, K. V. Gensh // My choice is science! : collection of materials of the VI Regional Youth Conference, XLVI scientific conference of students, undergraduates, postgraduates and students of lyceum classes, Barnaul, April 17-27, 2019. Barnaul: Altai State University. 2020; pp. 1256-1261. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43841476>.
21. Obtaining hydrolyzed cellulose from aspen and pine wood under the influence of microwave radiation / E. Y. Kushnir, N. G. Bazarnova, T. S. Gensh, K. V. Gensh // New achievements in chemistry and chemical technology of plant raw materials : Materials of the VIII All-Russian conference with international participation, Barnaul, 05-09 October 2020 / Edited by N.G. Bazarnova, V.I. Markin. Barnaul: Altai State University. 2020; pp. 43-45. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44188333>.
22. Comparative studies of the physico-chemical properties and structure of cotton cellulose and its modified forms / A. A. Atakhanov, B. Mamadierov, M. Kuzieva [et al.] // Chemistry of vegetable raw materials. 2019; No. 3: pp. 5-13. – DOI: <http://doi.org/10.14258/jcprm.2019034554>. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41311613>.
23. Patent No. 2804640 C2 Russian Federation, IPC C08B 15/02. Method of continuous production of microcrystalline cellulose : No. 2022106827 : application 03.03.2022 : publ. 03.10.2023 / A. I. Sizov, A. A. Dobrovolsky, A.V. Mukhamedshin, S. D. Pimenov ; applicant Limited Liability Company "Kristacel". – 7 s. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54674742>.
24. Obtaining powdered microcrystalline cellulose from wood pulp and the study of its properties / O. A. Noskova, F. H. Khakimova, R. R. Khakimov, E. A. Kataev // Science and technology: modernization, innovation, progress : A collection of scientific papers based on the materials of the X International Scientific and Practical Conference, Anapa, December 27, 2022. – Anapa: Limited Liability Company "Scientific Research Center of Economic and Social Processes" in the Southern Federal District. 2022; pp. 62-67. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50338313>.
25. Kaplev, E. V. Methods of obtaining powdered cellulose materials / E. V. Kaplev, L. V. Yurtayeva // The state of the environment, environmental problems and ways to solve them : Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Ust-Ilimsk, December 20-21, 2021. – Irkutsk: Baikal State University. 2022; pp. 79-85. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48215448>.
26. The influence of knife and non-knife grinding methods on fibrous material / A.V. Goncharov, O. N. Fedorova, R. A. Marchenko, Yu. D. Alashkevich // Forest and chemical complexes - problems and solutions : A collection of materials based on the results of the All-Russian scientific and practical conference, Krasnoyarsk, 02-04 September 2019. – Krasnoyarsk: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev". 2019; pp. 315-317. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41219738>.

27. Marchenko, R. A. Knife-free processing of secondary fibrous raw materials in the pulp and paper mill / R. A. Marchenko, V. I. Shurkina, A. A. Muravitskaya // Reshetnev readings : Materials of the XXIII International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of the General designer of rocket and Space Systems, Academician M.F. Reshetnev. In 2 parts, Krasnoyarsk, November 11-15, 2019 / Under the general editorship of Yu.Yu. Loginov. Volume Part 2. – Krasnoyarsk: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev". 2019; pp. 98-99. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41824511>.

28. Obtaining the analytical dependence of the strength properties of paper on the paper-forming parameters of the fibrous mass / L. V. Yurtayeva, N. S. Reshetova, Yu. D. Alashkevich [et al.] // Chemistry of vegetable raw materials. 2020; No. 4: pp. 501-509. – DOI: <http://doi.org/10.14258/jcprm.2020048583>. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44529573>.

29. Kaplev, E. V. The influence of the grinding regime on the physico-mechanical properties of bleached sulfate cellulose / E. V. Kaplev, L. V. Yurtayeva, Yu. D. Alashkevich // Problems of mechanics of pulp and paper materials : Materials of the V International Scientific and Technical Conference dedicated to the memory of Professor V.I. Komarov, Arkhangelsk, September 11-14, 2019. Arkhangelsk: M.V. Lomonosov Northern (Arctic) Federal University. 2019; pp. 87-92. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42408660>.

30. Grinding of deciduous cellulose using a headset with a curved shape of knives / E. M. Batrakevich, V. I. Shurkina, R. A. Marchenko, N. E. Shumarina // Reshetnev readings : Materials of the XXV International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of the General designer of rocket and Space Systems, Academician M.F. Reshetnev. In 2 parts, Krasnoyarsk, November 10-12, 2021 / Under the general editorship of Yu.Yu. Loginov. Volume Part 2. – Krasnoyarsk: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev". 2021; pp. 88-89. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47712294>.

31. Voronin, I. A. The mechanism of grinding on a knife centrifugal grinding machine / I. A. Voronin, Yu. D. Alashkevich, V. A. Kozhukhov // Chemistry of vegetable raw materials. 2020; No. 4: Pp. 485-492. – DOI: <http://doi.org/10.14258/jcprm.2020048164>. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44529571>.

32. The effect of grinding annual plant polymers on the process of obtaining finely dispersed cellulose / L. V. Yurtayeva, Yu. D. Alashkevich, E. V. Kaplev, E. A. Slizikova // Coniferous boreal zones. 2023. No. 4. pp. 361-368. – DOI: <http://doi.org/10.53374/1993-0135-2023-4-361-368>. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54398267>.

33. Patent No. 2803626 C1 Russian Federation, IPC D21C 1/04. Method for obtaining microcrystalline cellulose : No. 2023103933 : application 20.02.2023 : publ. 18.09.2023 / Yu. D. Alashkevich, V. I. Kovalev, L. V. Yurtayeva, E. V. Kaplev, E. A. Slizikova; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State University The University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev". – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54659924>.

### Сведения об авторах

✉ *Юртаева Лариса Владимировна* – кандидат техн. наук, доцент, доцент кафедры машин и аппаратов промышленных технологий, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, Российская Федерация, 660037, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6045-3442>, e-mail: [2052727@mail.ru](mailto:2052727@mail.ru).

*Алашкевич Юрий Давыдович* – академик РАО, доктор техн. наук, профессор кафедры машин и аппаратов промышленных технологий, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, Российская Федерация, 660037, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9894-2630>, e-mail: [alashkevichud@sibsau.ru](mailto:alashkevichud@sibsau.ru).

*Каплёв Евгений Вячеславович* – аспирант, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, Российская Федерация, 660037, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0235-7630>, e-mail: [kaplyov2017@mail.ru](mailto:kaplyov2017@mail.ru).

*Патраков Владимир Андреевич* – сотрудник студенческого конструкторского бюро «Промышленные технологии», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, Российская Федерация, 660037, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4673-0367>, e-mail: [Patrakov\\_vo03@mail.ru](mailto:Patrakov_vo03@mail.ru).

*Колосова Ева Романовна* – сотрудник студенческого конструкторского бюро «Промышленные технологии», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, Российская Федерация, 660037, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6863-7822>, e-mail: [eva.kolosova@mail.ru](mailto:eva.kolosova@mail.ru).

### Information about the authors

✉ *Larisa V. Yurtayeva* – Cand. Sci. (Techn.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Machines and Devices of Industrial Technologies, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660037, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6045-3442>, e-mail: [2052727@mail.ru](mailto:2052727@mail.ru).

*Yuri D. Alashkevich* – Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Techn.), Professor of the Department of Machines and Applications of Industrial Technologies, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660037, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9894-2630>, e-mail: [alashkevichud@sibsau.ru](mailto:alashkevichud@sibsau.ru).

*Eugene V. Kaplyov* – postgraduate student, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660037, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0235-7630>, e-mail: [kaplyov2017@mail.ru](mailto:kaplyov2017@mail.ru).

*Vladimir A. Patrakov* – employee of the student design bureau "Industrial Technologies", Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660037, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4673-0367>, e-mail: [Patrakov\\_vo03@mail.ru](mailto:Patrakov_vo03@mail.ru).

*Eva R. Kolosova* – employee of the student design bureau "Industrial Technologies", Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660037, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0235-7630>, e-mail: [kaplyov2017@mail.ru](mailto:kaplyov2017@mail.ru).

✉ – Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/13>

УДК 674-419.32



## Магнитообработанный композиционный материал для производства фанеры на основе уплотненного шпона осины (*Populus tremula* L.) и комплексного связующего с нанокристаллической целлюлозой

Екатерина В. Ющенко , [katerina.vgltu@yandex.ru](mailto:katerina.vgltu@yandex.ru),  <https://orcid.org/0000-0002-4827-2756>

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

В статье исследовано влияние комплексного воздействия технологических факторов на свойства композиционного материала при производстве фанеры из осинового шпона, используемой для получения блоков LVL, применяемых в строительстве. Для производства композиционной фанеры предложено использование уплотненного прокаткой шпона осины и комплексного связующего, включающего фенолоформальдегидную смолу марки СФЖ-3014 и нанокристаллическую целлюлозу, обработанного в ультразвуковом поле, при наличии электромагнитного воздействия на готовую фанеру импульсным магнитным полем. Введение в связующее 2 мас.% нанокристаллической целлюлозы позволило получить фанеру, обладающую повышенными физико-механическими показателями: пределом прочности при статическом изгибе (на 155 %), при скалывании по клеевому шву (на 330%), ударной вязкостью при изгибе (на 144 %). Гидрофобизация шпона карданолом обеспечила уменьшение влагопоглощения фанеры (на 300 %) и разбухания в направлении прессования (на 125 %). Исследование выполнено по плану Хартли с варьируемыми факторами: содержание нанокристаллической целлюлозы в связующем (от 2 до 6 мас.%), давление прессования (от 3 до 9 МПа), время воздействия импульсного магнитного поля (от 1 до 9 мин).

**Ключевые слова:** нанокристаллическая целлюлоза, фанера, модификация, фенолоформальдегидная смола, ультразвук, импульсное магнитное поле, осина, *Populus tremula* L.

**Финансирование:** данное исследование не получало внешнего финансирования.

**Благодарности:** автор благодарит рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.


**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Ющенко, Е. В. Магнитообработанный композиционный материал для производства фанеры на основе уплотненного шпона осины (*Populus tremula* L.) и комплексного связующего с нанокристаллической целлюлозой / Е. В. Ющенко // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 1 (53). – С. 219–237. – Библиогр.: с. 234–237 (22 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/13>.

Поступила 29.01.2024. Пересмотрена 19.02.2024. Принята 29.02.2024. Опубликована онлайн 20.03.2024.

Article

## Magnetically processed composite material for the production of plywood based on compacted aspen veneer (*Populus tremula* L.) and a complex binder with nanocrystalline cellulose

Ekaterina V. Yushchenko ✉, katerina.vgltu@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-4827-2756>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

### Abstract

The article examines the effect of the complex effect of technological factors on the properties of a composite material in the production of aspen veneer plywood used for the production of LVL blocks used in construction. To obtain composite plywood, it is proposed to use an aspen veneer compacted by rolling and a complex binder including phenol-formaldehyde resin of the SFG-3014 brand and nanocrystalline cellulose treated in an ultrasonic field, in the presence of electromagnetic action on the finished plywood by a pulsed magnetic field. Introduction to binder 2 wt. The use of nanocrystalline cellulose made it possible to obtain plywood with increased physical and mechanical properties: tensile strength during static bending (at 155 %), when chipping along the adhesive seam (at 330 %), impact strength during bending (at 144 %). The hydrophobization of the veneer with cardanol ensured a decrease in moisture absorption of plywood (at 300 %) and swelling in the direction of pressing (at 125 %). The study was carried out according to the Hartley plan with varying factors: the content of nanocrystalline cellulose in the binder (from 2 to 6 wt.%), pressing pressure (from 3 to 9 MPa), exposure time to a pulsed magnetic field (from 1 to 9 min).

**Keywords:** *nanocrystalline cellulose, plywood, modification, phenol-formaldehyde resin, ultrasound, pulsed magnetic field, aspen, Populus tremula* L.

**Funding:** this research received no external funding.

**Acknowledgments:** author thank the reviewers for their contribution to the peer review.

**Conflict of interest:** the author declares no conflict of interest.

**For citation:** Yushchenko E. V. (2024). Magnetically processed composite material for the production of plywood based on compacted aspen veneer (*Populus tremula* L.) and a complex binder with nanocrystalline cellulose. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 1 (53), pp. 219-237 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/13>.

**Received** 29.01.2024. **Revised** 19.02.2024. **Accepted** 29.02.2024. **Published online** 20.03.2024.

### Введение

Изделия из клееной древесины, в том числе фанера, занимают значительное место в готовой продукции современных деревообрабатывающих предприятий. Мировой объем производства фанеры ежегодно составляет в среднем около 170 млн м<sup>3</sup>. За прошлый год по данным Росстата объем производства фанеры для российского рынка составил 3,241 млн м<sup>3</sup>. Р. М. Нифталиев и А. А. Побединский [1] от-

носят фанеру к эффективным видам древесных композиционных материалов и отмечают ряд достоинств фанеры сравнительно с клееными балками и пиломатериалами. Использование 1 м<sup>3</sup> фанеры в качестве обшивочного материала аналогично применению 3,3 м<sup>3</sup> пиломатериалов. А. В. Чуркина [2] подчеркивает, что фанера получила широкое распространение благодаря возможности прогнозирования необходимых свойств, получаемых за счёт струк-



турных изменений в технологии изготовления. Основными недостатками фанеры является ее низкая стойкость к влаге и механическому воздействию.

Современными учеными непрерывно ведутся работы по поиску возможных методов улучшения физико-механических показателей фанеры. Одним из них является замена традиционного связующего. Так, Hangbo Yue и др. [3] анализируется возможность применения клеев на биологической основе, полученных из разного рода растительных белков. Однако, применение в чистом виде подобного связующего не представляется возможным, ввиду того, что его адгезионная прочность и водостойкость находятся на достаточно низком уровне. Соответственно, возникает необходимость дополнительной обработки, к которой можно отнести различные методы химической и физической модификации. Yongbo Jia и др. [4] в качестве связующего рассматривается применение желатинизированного кукурузного крахмала, модифицированного дигидрофосфатом аммония, что дает возможность получения огнестойкой фанеры с использованием экологичного клея.

Влияние связующего на физико-механические показатели фанеры рассмотрены в научных трудах современных учёных. А. А. Федотовым и А. В. Юдиным [5] установлено, что фанера на основе пленки вторичного полиэтилена низкой плотности по своим характеристикам уступает фанере марки ФСФ, но превосходит фанеру марки ФК. Работа с аналогичным связующим представлена Siqi Zheng и др. [6], в которой оптимальные физико-механические параметры достигались при увеличении времени горячего прессования.

В работах А. Р. Абдразаковой и др., Д. Н. Николаевой и др. [7, 8] показан экологический аспект при использовании разного типа связующего в технологическом процессе производства фанеры.

В.А. Шамаев и др. [9] отмечают, что производство композиционной фанеры позволяет получить новый более качественный материал с высокими физико-механическими показателями, такими как легкость, устойчивость к химическому воздействию, низкое влагопоглощение и др., что позволяет существенно расширить спектр применения композиционной фанеры.

Е. М. Разиньковым в работе [10] показано, что наиболее рациональным и экономически выгодным методом улучшения физико-механических показателей фанеры является введение в клеевую смесь модификаторов, повышающих когезионную и адгезионную прочность связующего.

А. А. Федотовым и др. [11] приводятся результаты комплексного исследования по применению различного рода модификаторов связующего при производстве фанеры марки ФСФ. Среди рассмотренных модифицирующих добавок диметилглиоксим и сульфосалициловая кислота обеспечивают лучшие прочностные показатели. Отмечается также, что хорошие качественные показатели материала достигаются при использовании модификаторов в виде хлорида железа и магния.

Д. С. Русаковым и др. [12] предложено в качестве модификатора использование техногенных отходов, образующихся при производстве алюминия. Применение фенолоформальдегидных смол, модифицированных угольной пылью электрофильтров алюминиевого производства способствует увеличению прочности фанеры до 50 %.

Kaihong Tang и др. [13] показаны методы синтеза модифицированной фенольной смолы за счёт полимеризационной и пердполимеризационной модификации. Отмечено, что указанные методы могут применяться и совместно для получения комплексных модифицированных фенольных материалов с улучшенными свойствами. С целью улучшения прочности фанеры Aydin Demir [14] исследовал танин валонии, полученный из желудя турецкого дуба, в качестве модификатора для карбамидоформальдегидной смолы. Electra Papadopoulou и др. [15] модифицировала фенолформальдегидные смолы электрохимически обработанным лигнином. Необходимо отметить, что при использовании данных модификаторов, наряду с уменьшением выделения формальдегида, снижались и прочностные характеристики плит.

Ali Reza Zanjanijam и др. [16] обосновывают возможность применения порошка каменного угля в качестве армирующей добавки к фенольной смоле.

S. Anirudh и др., Mengjie Wang и др., Е. В. Ющенко и К. В. Жужукин [17-19] исследовали

модифицирование связующего углеродными нанотрубками для улучшения физико-механических показателей древесных композитных материалов.

Ali Dorieh и др., К. В. Жужукиным и др. [20, 21] с целью улучшения технологических свойств фанеры проводилось изучение влияния нанокристаллической целлюлозы (НКЦ) в качестве наполнителя фенолформальдегидного связующего.

О. Ф. Шишловым и др. [22] экспериментально доказано положительное влияние карданола на водостойкость древесных композиционных материалов при использовании его в качестве модифицирующей добавки к фенолформальдегидной смоле.

Несмотря на многочисленные исследования в области оптимизации параметров производства и физико-механических показателей фанеры для повышения ее прочностных характеристик, наблюдается противоречивость в изменении параметров, когда улучшение одного из показателей приводит к снижению ряда других. Это обстоятельство создаёт необходимость дальнейшего изучения актуальной задачи улучшения качества композиционной фанеры.

В связи с целевым назначением исследуемой модифицированной фанеры, используемой для производства блоков LVL повышенной прочности, необходимы изменения в технологии получения фанеры, заключающиеся в добавлении в связующее наноцеллюлозы, дополнительном уплотнении шпона, ультразвуковой и электромагнитной обработки связующего, а также обработке шпона карданола. Блоки LVL, в свою очередь, будут использоваться в строительстве, что определяет условия их эксплуатации и объясняет необходимость применения вышеуказанной дополнительной обработки.

Целью данной работы является исследование влияния технологических факторов производства: давления прессования, содержания наноцеллюлозы в связующем, времени воздействия импульсного магнитного поля на физико-механические показатели композиционной фанеры марки ФСФ, изготовленной на основе уплотненного шпона осины (*Populus tremula* L.) и комплексного связующего, включающего фенолформальдегидную смолу, модифицированную НКЦ.

### Материалы и методы

#### - Объект и предмет исследований

Объектом исследования является фанера марки ФСФ, изготовленная из шпона осины (*Populus tremula* L.). Для осуществления эксперимента использованы образцы модифицированной композиционной фанеры и образцы фанеры, полученной в соответствии со стандартным режимом прессования.

Предмет исследования – влияние нанокристаллической целлюлозы в качестве модифицирующей добавки к связующему в виде смолы СФЖ-3014 (ГОСТ 20907–2016) на физико-механические показатели фанеры марки ФСФ.

#### - Дизайн эксперимента

Для получения композиционной фанеры использовали исходные материалы:

- шпон осиновый, размер 500×500 мм, толщиной 4 мм и влажностью  $8\pm 2\%$  без видимых дефектов (производство ООО «Галичский фанерный комбинат», Галич, Россия);

- смола фенолформальдегидная СФЖ-3014 (производство ПАО «Уралхимпласт», Н.Тагил, Россия);

- нанокристаллическая целлюлоза дисперсностью 300-900 нм (производство Nanografi Nano Technology, Ankara, Turkey).

Свойства полученной композиционной фанеры сравнивали с физико-механическими показателями контрольного образца, изготовленного в виде пятислойной фанеры на основе лущеного осинового шпона номинальной толщиной 4 мм, предварительно высушенного до влажности ( $7\pm 1\%$ ) (ГОСТ 99–2016) и связующего – смолой СФЖ-3014 без модификатора. После нанесения связующего и формирования пакета проводилось горячее прессование в гидравлическом прессе ПД476 с обогреваемыми плитами (усилие 160 тнс, производство ОАО «Гидропресс», Оренбург) по следующему режиму: время выдержки в прессе – 20 мин., удельное давление прессования – 2,2 МПа, температура плит пресса – 140 °С, расход связующего – 155 г/м<sup>2</sup>.

Экспериментальные образцы изготавливали из шпона, который предварительно пластифицировали: выдерживали в течение трех часов при температуре 18 °С в 30 %-м водном растворе карбамида технического марки Б. Далее шпон прокатывали в

отапливаемом прокатном стане (производство ООО «Модификация», Воронеж, Россия) при температуре вальцов 150 °С до степени уплотнения 30 %. Уплотнение происходило за счет уменьшения объема пор древесины из-за потери устойчивости их оболочек при сжатии. Плотность контрольного и модифицированного образца шпона определяли согласно ГОСТ 20800-75. Далее шпон дополнительно пропитывали гидрофобизатором – карданолом с последующей сушкой в сушильной камере в течение 3 часов при температуре 70 °С. Связующее с модификатором для лучшего смешивания и химического взаимодействия компонентов смеси обрабатывалось в ультразвуковой установке УЗК 1,3 с рабочей частотой 24 кГц. Проводилась серия экспериментов из пятнадцати опытов. Клей наносили на шпон шпателем. При формировании пакета фанеры направление

волокон в шпоне было взаимно перпендикулярным в каждом последующем слое в отличие традиционной технологии производства LVL. Прессование осуществлялось при постоянных параметрах: расход связующего – 155 г/м<sup>2</sup>, время выдержки в прессе – 20 минут, температура плит пресса – 140 °С.

Перед испытанием все образцы фанеры выдерживались в течение 1 суток при 18±2 °С и относительной влажности 65±5 %. Далее фанера подвергалась воздействию импульсного магнитного поля (ИМП) на установке ИМП-1 (напряженность 18·10<sup>4</sup> А/м). Затем фанера раскраивалась для проведения дальнейших испытаний.

Характеристика шпона осины представлена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика шпона осины

Table 1

Characteristics of aspen veneer

Параметр   Parameter	Величина   Value
Влажность, %   Humidity, %	8
Длина, мм   Length, mm	500
Ширина, мм   Width, mm	500
Толщина, мм   Thickness, mm	4
Плотность, кг/м <sup>3</sup>   Density, kg/m <sup>3</sup>	450

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Гидрофобизатором в данной работе выступает карданол, фенолсодержащий мономер растительного происхождения, содержащий в м- положении ненасыщенный линейный С<sub>15</sub> – алкильный заместитель. Это смесь алкилфенолов, состоящую

преимущественно из 3-(8/Z)-пентадеценил (фенола), 3-(8/ Z),11/ Z) – пентадекдиенил) фенола и 3-(8/ Z), (11/ Z), 14 – пентадекатриенил) – фенола. Характеристика карданолола показана в табл. 2.

Таблица 2

Характеристика карданолола

Table 2

Characteristics of cardanol

Параметр   Parameter	Величина   Value
Плотность, г/см <sup>3</sup>   Density, kg/m <sup>3</sup>	0,93
Вязкость, сП   Viscosity, sP	55
Йодное число, г I <sub>2</sub> /100 г   Iodine number, g I <sub>2</sub> /100 g	317
Гидроксильное число   Hydroxyl number	181

Источник: публичное акционерное общество «Уралхимпласт», г. Н. Тагил

Source: public joint stock company «Uralkhimplast», N. Tagil

Матрицей комплексного связующего является фенолформальдегидная смола марки СФЖ-

3014, характеристика которой представлена в табл. 3.

Таблица 3

Характеристика смолы СФЖ-3014

Table 3

Characteristics of SFG-3014 resin

Параметр   Parameter	Величина   Value
Плотность, г/см <sup>3</sup>   Density, kg/m <sup>3</sup>	1,2
Условная вязкость, с   Conditional viscosity, s	75
Сухой остаток, %   Dry residue, %	50
Массовая доля щелочи, %   Mass fraction of alkali, %	6,2
Массовая доля свободного фенола, %   Mass fraction of free phenol, %	0,1
Массовая доля свободного формальдегида, %   Mass fraction of free phenol, %	0,1
Предел прочности при скалывании по клеевому слою фанеры после кипячения в течение 1 ч, МПа   Tensile strength when chipping on an adhesive layer of plywood after boiling for 1 h, МПа	1,47

Источник: публичное акционерное общество «Уралхимпласт», г. Н.Тагил

Source: public joint stock company «Uralkhimplast», N. Tagil

Компонентом комплексного связующего является нанокристаллическая целлюлоза. Её характеристики даны в табл. 4.

Таблица 4

Характеристика нанокристаллической целлюлозы

Table 4

Characteristics of nanocrystalline cellulose

Параметр   Parameter	Величина   Value
Внешний вид (Цвет)   Appearance (Color)	Белый/почти белый   White/off white
Внешний вид (Форма)   Appearance (Form)	Порошок, высушенный распылением (влажность <6,0%)   Spray Dried powder (<6.0% moisture)
Средний размер частиц (ширина x длина), нм   Average Particle Size (wide x length), nm	10-20 x 300-900
Кристалличность целлюлозы (XRD), %   Cellulose Crystallinity (XRD), %	92
Температура разложения кристаллической нанокристаллической целлюлозы (ТГА в N <sub>2</sub> ), °С   Decomposition Temperature of Crystalline Nanocellulose (TGA in N <sub>2</sub> ), °C	349
Плотность, г/см <sup>3</sup>   Density, g/cm <sup>3</sup>	1,49
Объемная плотность, г/см <sup>3</sup>   Bulk Density, g/cm <sup>3</sup>	0,5-0,8
Размер частиц, дисперсный порошок при концентрации 2% (мас.), нм   Particle Size, dispersed powder at 2% (w/w), nm	<150
pH, дисперсный порошок при концентрации 2% (мас./мас.)   pH, dispersed powder at 2% (w/w)	5,0-8,0
Проводимость, дисперсный порошок при 2% (по массе), мСм   Conductivity, dispersed powder at 2% (w/w), μS	<350
Вязкость, дисперсный порошок при 2% (мас./мас.), сП   Viscosity, dispersed powder at 2% (w/w), sP	>5

Источник: <https://nanografi.com/popular-products/cellulose-nanocrystal-nanocrystalline-cellulose-cnc/>

Source: <https://nanografi.com/popular-products/cellulose-nanocrystal-nanocrystalline-cellulose-cnc/>

## Деревопереработка. Химические технологии

Для обработки композиционной фанеры использовали генератор импульсного магнитного поля.

Его технические характеристики представлены в табл. 5.

Таблица 5

Технические характеристики генератора импульсного магнитного поля

Table 5

Generator Specifications pulsed magnetic field

Параметр   Parameter	Величина   Value
Количество заготовок, шт   Number of blanks, pcs	1
Форма импульса   The shape of the pulse	треугольная   triangular
Сила тока в импульсе, кА   The current in the pulse, kA	2
Индуктивность соленоида, мкГн   Inductance of the solenoid, mkH	5-10
Частота подачи импульсов, Гц   Pulset frequency, Hz	100
Напряженность, А/м   Tension, A/m	$18 \cdot 10^4$
Длительность импульса, мкс   Pulse duration, mks	10
Число импульсов при обработке   The number of pulses during processing	3000/6000
Размер заготовок, мм   The size of the workpieces, mm	50x50x100
Длительность обработки образцов, с   Duration of sample processing, s	30/60
Максимальная индукция магнитного поля, Тл   Maximum magnetic field induction, T	0,3
Плотность намотки соленоида, витков/метр   The winding density of the solenoid, turns/meter	180

Источник: ВГЛТУ, Лаборатория физико-механических измерений древесины, РФ  
Source: VSUFT, Laboratory of Physical and Mechanical Measurements of Wood, RF

Комплексное связующее для производства композиционной фанеры обрабатывалось в ультразвуковой ванне.

Технические характеристики ультразвуковой ванны приведены в табл. 6.

Таблица 6

Технические характеристики ультразвуковой ванны

Table 6

Specifications of ultrasonic cleaner

Параметр   Parameter	Величина   Value
Габариты рабочей емкости, м   Working container dimensions, m	0,12x0,11x0,1
Рабочий объем, м <sup>3</sup>   Working volume, m <sup>3</sup>	$1,3 \cdot 10^{-3}$
Рабочая частота, кГц   Operating frequency, kHz	$24,0 \pm 7,5\%$
Ультразвуковая мощность, Вт   Ultrasonic power, W	80
Напряжение питания, В/Гц   Supply voltage, V/ Hz	220/50
Температура жидкости, °С   Liquid temperature, °C	20-105

Источник: ООО «Спецмаш», РФ  
Source: LLC Spetsmash, RF

Отбор образцов для испытания физико-механических показателей проводился в соответствии с ГОСТ 9620-94.

Определение предела прочности при скалывании по клеевому слою и статическом изгибе про-

водили на испытательной машине УМ-5А с максимальным разрушающим усилием до 5000 Н (по ГОСТ 28840-90).

Испытание на прочность при скалывании по клеевому слою осуществлялось согласно ГОСТ 9624–2009. Для испытания использовали десять образцов. Предварительно испытуемые образцы подвергались выдержке в кипящей воде в течение 1 ч с последующей выдержкой при комнатной температуре в течение (10±1 мин). Результаты испытаний рассчитывали, как среднее арифметическое из десяти полученных значений.

Прочность фанеры при статическом изгибе определялась согласно ГОСТ 9625–2013. Для испытания использовали шесть образцов: половина образцов располагалась верхней пластью вверх, другая половина – верхней пластью вниз. Прочность фанеры при статическом изгибе определялась как среднее арифметическое из шести полученных значений.

Ударная вязкость при изгибе определялась согласно ГОСТ 9626–90 по шести образцам как среднее арифметическое значение.

Определение влагопоглощения проводили по методике ГОСТ 21523.6-77. Для эксперимента использовали тридцать образцов. Величину влагопоглощения рассчитывали по среднему значению.

Используя план Хартли, построили матрицу планирования для трех входных факторов. Матрица состоит из точек полнофакторного эксперимента, к которому добавлено 6 звездных точек и 1 центральный опыт. Общее число опытов таким образом равно  $N=8+6+1=15$ .

Для упрощения и унифицирования записи условий опытов, облегчения обработки экспериментальных данных вводятся нормализованные обозначения факторов по формуле:

$$x_j = \frac{\tilde{x}_j - \tilde{x}_{j^0}}{J_j}, \quad (1)$$

где  $X_j$  – кодированное значение фактора;  
 $\tilde{X}_j$  – натуральное значение фактора;  
 $\tilde{x}_{j^0}$  – натуральное значение основного уровня;

$J_j$  – интервал варьирования.

Для эксперимента были выбраны следующие постоянные факторы:

тепелъ прессования шпона,  $\varepsilon = 30 \%$ ;  
 температура прокатки шпона,  $T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  
 содержание карданола,  $C = 100 \text{ г/м}^2$ ;  
 время активации НКЦ ультразвуком,  
 $t = 20 \text{ мин}$ ;  
 температура горячего пресса,  $T = 140 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  
 время выдержки в прессе,  $t = 20 \text{ мин}$ .

Входные факторы:

$X_1$  – содержание НКЦ в смоле, мас.%;

$X_2$  – давление прессования, МПа;

$X_3$  – время обработки импульсным магнитным полем, мин.

Выходные факторы:

$Y_1$  – предел прочности при скалывании, МПа;

$Y_2$  – предел прочности при статическом изгибе, МПа;

$Y_3$  – разбухание в направлении прессования при водопоглощении, %.

В табл. 7 приведена матрица планирования эксперимента в кодированных значениях факторов.

Таблица 7

Матрица планирования эксперимента

Table 7

Experiment planning matrix

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	+1	+1	+1
2	-1	+1	+1
3	+1	-1	+1
4	-1	-1	+1
5	+1	+1	-1
6	-1	+1	-1
7	+1	-1	-1
8	-1	-1	-1
9	+1	0	0
10	-1	0	0
11	0	+1	0
12	0	-1	0
13	0	0	+1
14	0	0	-1
15	0	0	0

Источник: собственные вычисления автора  
Source: own calculations

В табл. 8 представлены граничные условия технологических факторов и интервалы их варьирования.

Таблица 8

Граничные условия входных факторов

Table 8

Boundary conditions of input factors

Код   Code	Фактор   Factor	Уровень варьирования   The level of variation		
		-	0	+
X <sub>1</sub>	Содержание нанокристаллической целлюлозы в смоле, мас.%   The content of nanocrystalline cellulose in resin, wt. %	2	4	6
X <sub>2</sub>	Давление прессования, МПа   Pressing pressure, МПа	5	9	13
X <sub>3</sub>	Время обработки импульсным магнитным полем, мин   Processing time by pulsed magnetic field, min	1	5	9

Источник: собственные вычисления автора  
Source: own calculations

Матрица планирования эксперимента в натуральных значениях факторов приведена в табл. 9.

Матрица планирования эксперимента в натуральных значениях факторов

Table 9

Experiment planning matrix in natural values of factors

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	6	13	9
2	2	13	9
3	6	5	9
4	2	5	9
5	6	13	1
6	2	13	1
7	6	5	1
8	2	5	1
9	6	9	5
10	2	9	5
11	4	13	5
12	4	5	5
13	4	9	9
14	4	9	1
15	4	9	5

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

**- Анализ данных**

Для определения достоверности аппроксимации использовали коэффициент детерминации R<sup>2</sup> (R-SQUARED). Для расчетов использовали программу Excel 2016.

**Результаты**

Обработка результатов исследований методом наименьших квадратов позволила получить уравнения зависимости между технологическими параметрами (давление прессование, содержание НКЦ в связующем, время воздействия ИМП) и показателями физико-механических свойств (предел прочности при скалывании и предел прочности при статическом изгибе). Изменение предела прочности при скалывании и предела прочности при статическом изгибе в натуральных значениях описывается уравнением:

$$\tau_{ск} = 0,398 - 0,447 \cdot X_1 + 0,153 \cdot X_2 + 0,099 \cdot X_3 + 0,059 \cdot X_1^2 + 0,003 \cdot X_2^2 + 0,003 \cdot X_3^2 - 0,018 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,004 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,015 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (2)$$

где  $\tau_{ск}$  – предел прочности при скалывании;

$$\sigma = -5,267 + 3,652 \cdot X_1 + 3,865 \cdot X_2 + 5,598 \cdot X_3 - 0,152 \cdot X_1^2 - 0,090 \cdot X_2^2 - 0,232 \cdot X_3^2 - 0,118 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,379 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,258 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (3)$$

где  $\sigma$  – предел прочности при статическом изгибе;

Наилучший результат определен при следующих значениях входных факторов:

- содержание НКЦ в смоле – 2 мас.%;
- давление прессования – 13 МПа;
- время обработки импульсным магнитным полем – 1 мин.

Значения выходных факторов, полученных по оптимальным показателям входных факторов для пятислойной фанеры из шпона осины:

- предел прочности при скалывании по клеевому слою: 2,1 МПа,
- предел прочности при статическом изгибе: 36,5 МПа.

Коэффициент детерминации R<sup>2</sup> для показателя предела прочности при скалывании равен 0,91, для показателя предела прочности при статическом



изгибе – 0,98, что свидетельствует о высокой степени корреляции теоретических расчетов и экспериментальных данных.

Определены: среднее значение предела прочности контрольных образцов фанеры из шпона осины при статическом изгибе вдоль волокон, равное 25,6 МПа, предел прочности при скалывании по

клеевому слою после кипячения в течение 1 ч – 0,6 МПа, которые соответствуют значениям действующих ГОСТ.

Результаты исследований предела прочности при скалывании по клеевому слою для экспериментальных образцов приведены в табл. 10.

Таблица 10

Предел прочности при скалывании по клеевому слою

Table 10

Tensile strength when chipping along the adhesive layer

№ образца   Sample №	Предел прочности при скалывании по клеевому слою $\tau_{ск}$ , МПа   Tensile strength when chipping along the adhesive layer $\tau_{ск}$ , МПа	№ образца   Sample №	Предел прочности при скалывании по клеевому слою $\tau_{ск}$ , МПа   Tensile strength when chipping along the adhesive layer $\tau_{ск}$ , МПа
1	0,36	9	0,02
2	0,74	10	1,10
3	0,08	11	0,64
4	1,07	12	0,10
5	0,58	13	0,28
6	2,00	14	0,45
7	0,49	15	0,39
8	0,16	-	-

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Анализируя табличные данные, установлено для образца № 6 максимальное значение показателя предела прочности при скалывании по клеевому слою, равное 2 МПа., клеевая композиция которого включала НКЦ в сухом виде в количестве 2 мас.%. Наиболее низкое значение показателя определили при испытании образцов № 3 и 9, в которых содержание НКЦ в смоле равно 6 мас.%, что в 3 раза превышает количество НКЦ в шестом образце. Повышение содержания НКЦ в связующем не приводит к увеличению прочности, что свидетельствует об эффекте малых добавок при модификации связующего фанеры.

Характер разрушения образцов после испытания на скалывание по клеевому слою представлен на рис. 1.



Рисунок 1. Характер разрушения образцов после проведения испытания на скалывание по клеевому слою: 1) – контрольный образец; 2) – образец, изготовленный по оптимальному режиму  
Figure 1. The nature of the destruction of the samples after the cleavage test on the adhesive layer: 1) – a control sample; 2) – a sample made according to the optimal mode

Источник: собственная композиция автора  
Source: author's composition

По характеру разрушения образцов, представленных на рис. 1, видно, что, у образца, изготовленного по оптимальному режиму (содержание НКЦ в смоле – 2 мас.%; давление прессования – 13 МПа; время обработки импульсным магнитным

полем – 1 мин), адгезионные показатели клея с добавлением модификатора, как и прогнозировалось, улучшились по сравнению с контрольным образцом. В табл. 11 отражены результаты исследований предела прочности при статическом изгибе.

Таблица 11

Предел прочности при статическом изгибе

Table 11

Static bending strength

№ образца   Sample №	Предел прочности при статическом изгибе $\sigma$ , МПа   Static bending strength $\sigma$ , МПа	№ образца   Sample №	Предел прочности при статическом изгибе $\sigma$ , МПа   Static bending strength $\sigma$ , МПа
1	21,56	9	28,46
2	21,50	10	36,53
3	17,79	11	34,80
4	34,20	12	28,52
5	30,28	13	24,77
6	38,33	14	34,02
7	30,22	15	30,45
8	14,24	-	-

Источник: собственные вычисления автора  
Source: own calculations

В результате анализа полученных данных определён наибольший показатель предела прочности при статическом изгибе для образца № 6, давление прессования которого принимали равным 13 МПа. Наиболее низкое значение показателя получили при испытании образцов № 3 и 8, давление прессования в этом случае более низкое 5 МПа.

Характер разрушения образцов после испытания на предел прочности при статическом изгибе представлен на рис. 2.

Тип разрушения образцов, представленных на рис. 2, неодинаков: при низких значениях давления прессования разрушение образцов фанеры проходило по второму слою, при более высоких значениях давления образец разрушался по второму и четвертому слоям.



Рисунок 2. Характер разрушения образцов после проведения испытания на предел прочности при статическом изгибе: 1) контрольный образец; 2) образец, изготовленный по оптимальному режиму

Figure 2. The nature of the destruction of the samples after the static bending tensile test: 1) a control sample; 2) a sample made according to the optimal mode

Источник: собственная композиция автора  
Source: author's composition

Различный характер разрушения образцов (контрольных и изготовленных по оптимальному режиму) при испытании предела прочности при скалывании по клеевому слою и предела прочности при

статическом изгибе аргументируется возникновением дополнительных межмолекулярных связей между связующим и шпоном после введения в смолу модификатора – наноцеллюлозы. В связи с этим наблюдается когезионный характер разрушения образцов модифицированной фанеры.

На графиках 1 и 2 показаны зависимость предела прочности при статическом изгибе от содержа-

ния НКЦ в смоле и давления прессования при постоянном значении времени воздействия ИМП (график 1) и зависимость предела прочности при скальвании по клеевому слою от содержания НКЦ в смоле и давления прессования при постоянном значении времени воздействия ИМП (график 2).

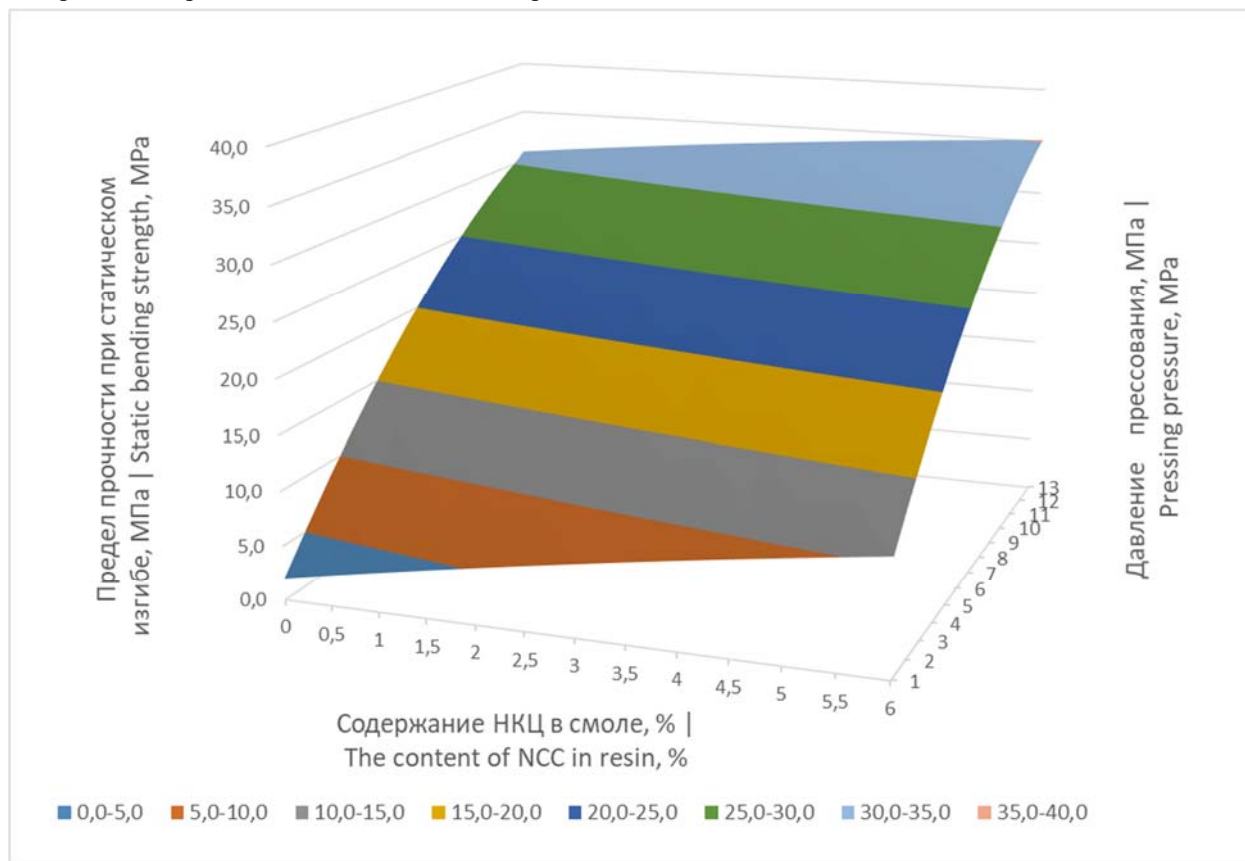


График 1. Зависимость предела прочности при статическом изгибе от содержания НКЦ в смоле и давления прессования

Graph 1. Dependence of the static bending strength on the NCC content in the resin and the pressing pressure

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

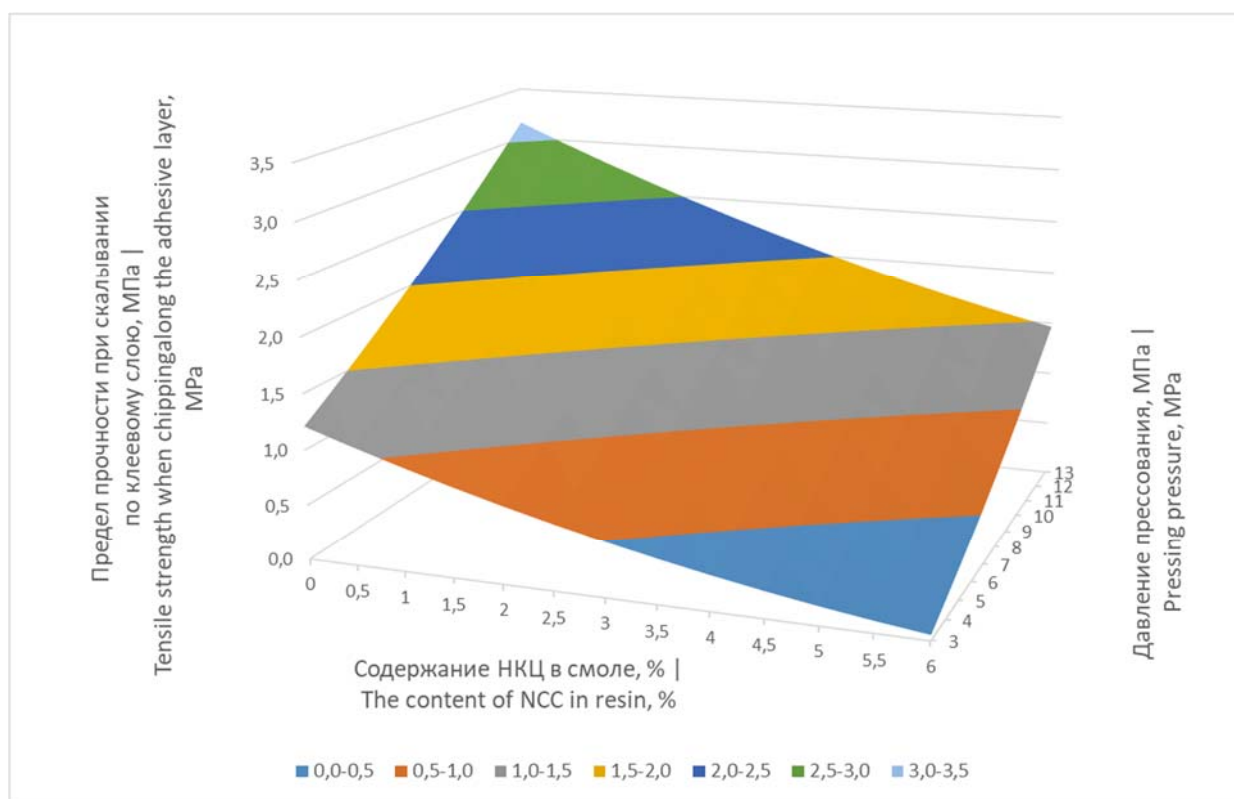


График 2. Зависимость предела прочности при скальвании по клеевому слою от содержания НКЦ в смоле и давления прессования

Graph 2. Dependence of the tensile strength when chipping along the adhesive layer on the content of NCC in the resin and the pressing pressure

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

В результате анализа полученных значений, представленных на рис. 3 и 4, установлено разнонаправленное изменение исследуемых параметров при фиксированных оптимальных значениях давления прессования и времени воздействия ИМП с увеличением количества НКЦ в смоле: значение предела прочности при скалывании по клеевому слою уменьшается, показатель предела прочности при статическом изгибе увеличивается. Возникает необходимость сбалансировать параметры режима прессования для получения фанеры с лучшими физико-механическими показателями. Оптимальные значения исследуемых показателей наблюдаются при содержании НКЦ в связующем в количестве 2 мас.%, что соответствует данным оптимального режима прессования.

При анализе сходимости результатов опыта и теоретических значений определили, что уравнение регрессии, описывающее зависимость экспериментальных данных предела прочности при скалывании по клеевому слою от содержания НКЦ в клеевой смеси, давления прессования, времени обработки импульсным магнитным полем не имеет физического смысла при содержании НКЦ в связующем в диапазоне от 4,5 до 6 мас.% и диапазоне давления прессования от 0 до 2 МПа. Практически это можно объяснить понижением вязкости смолы до критического уровня при введении НКЦ в связующее в количестве свыше 4 мас.%.

Далее исследовали гидрофобность фанеры, определив такие показатели как влагопоглощение, разбухание в воде в направлении прессования. Среднее значение разбухания образцов фанеры в направлении прессования после 24 часов выдержки в воде 12,1 %. Показатель влагопоглощения для образцов с использованием гидрофобизатора – 9,7 %. Для контрольных образцов среднее значение разбухания в направлении прессования после 24 часов выдержки в воде составило 16,6 %, а влагопоглощения – 27 %. Данный эффект обусловлен влиянием гидрофобизатора карданола, образующего с молекулами смолы трехмерные сети, препятствующие разбуханию.

Образец фанеры, изготовленный по оптимальному режиму, подвергался дальнейшим испытаниям на ударную вязкость при изгибе. Для проведения эксперимента использовали шесть образцов,

среднее значение ударной вязкости при изгибе составило 38,8 КДж/м<sup>2</sup>, что превышает значение по ГОСТ (34 КДж/м<sup>2</sup>) и значение, полученное при испытании контрольного образца, равное 34,1 КДж/м<sup>2</sup>.

### Обсуждение

В.А. Шамаевым, К. В. Жужукиным, Ali Dorieh и др. исследовалось применение НКЦ в качестве модификатора карбамидоформальдегидных и фенолоформальдегидных смол при производстве древесных композиционных материалов. В.А. Шамаев с коллегами [9] установили возрастание в 1,5 раза прочности клеевого шва в изготовленной фанере и модифицированной древесине при идентичной ультразвуковой обработке связующего и последующей электромагнитной обработке фанеры и модифицированной древесины. К. В. Жужукиным и др. [21] проводился анализ работ, в котором рассматривался эффект повышения прочности клеевого шва фанеры в 1,5 раза в результате введения нанокристаллической целлюлозы в связующее для производства фанеры, с последующей обработкой её в импульсном магнитном поле. В обзоре Ali Dorieh и др. [20] сообщается, что использование фенольных полимеров, армированных наноцеллюлозой улучшает механические характеристики фанеры, например, прочность фанеры при скалывании по клеевому шву увеличивается на 17%.

В отличие от приведённых источников, в представленной работе показано, что при использовании наноцеллюлозы в фенолформальдегидном связующем, уплотнении шпона и обработки композиционной фанеры (на этом связующем) импульсным электромагнитным полем позволяет в большей степени увеличить прочность фанеры, т. е. данный технологический режим и разработанный состав связующего приоритетны для производственного процесса получения более качественной композиционной фанеры, планируемую к использованию в качестве основы для производства блоков LVL, которые будут применяться в строительстве.

### Заключение

1. Для повышения качества фанеры исследовано направление изменения технологических факторов, приводящее к улучшению физико-механических показателей. Определено общее увеличение прочности композиционной фанеры более чем на

200% по сравнению с немодифицированной при добавлении в связующее НКЦ в количестве 2 мас.%; повышении предела прочности при скалывании по клеевому слою на 330 %, твёрдости поперёк волокон на 327 % и менее значительное повышение предела прочности при статическом изгибе на 155 % и ударной вязкости на 114 % (давление прессования 13 МПа и время воздействия импульсным магнитным полем 1 мин). Повышение прочности обусловлено образованием межмолекулярных связей между функциональными группами компонентов связующего и шпона.

2. Определены оптимальные значения исследуемых параметров, при которых достигаются наилучшие показатели физико-механических свойств композиционной фанеры: содержание НКЦ в смоле – 2 мас.%; давление прессования – 13 МПа; время обработки импульсным магнитным полем – 1 мин.

3. В результате предварительной обработки фанеры карданолом определено снижение на 300 % её влагопоглощения (за 30 суток) и разбухания (на 125 %) в направлении прессования. Эффект обусловлен возможным образованием трехмерных сетей между молекулами карданола и связующего.

4. Установлено улучшение физико-механических показателей магнитообработанной композиционной фанеры, полученной при использовании уплотнённого осинового шпона и комплексного связующего, обработанного в ультразвуковом поле. Полученный эффект достигается вследствие гомогенизации связующего при ультразвуковой обработке и активации межфазового слоя на границе шпон-связующее при воздействии импульсного магнитного поля.

5. На основе анализа результатов опыта и теоретических значений планирования эксперимента получены следующие уравнения регрессии:

$$\tau_{\text{ск}} = 0,398 - 0,447 \cdot X_1 + 0,153 \cdot X_2 + 0,099 \cdot X_3 + 0,059 \cdot X_1^2 + 0,003 \cdot X_2^2 + 0,003 \cdot X_3^2 - 0,018 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,004 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,015 \cdot X_2 \cdot X_3$$

$$\sigma = -5,267 + 3,652 \cdot X_1 + 3,865 \cdot X_2 + 5,598 \cdot X_3 - 0,152 \cdot X_1^2 - 0,090 \cdot X_2^2 - 0,232 \cdot X_3^2 - 0,118 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,379 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,258 \cdot X_2 \cdot X_3,$$

адекватно (коэффициент детерминации  $R^2$ : 0,91 и 0,98 соответственно) описывающие зависимости экспериментальных данных пределов прочности при скалывании и при статическом изгибе от содержания НКЦ в клеевой смеси, давления прессования, времени обработки импульсным магнитным полем.

### Список литературы

1. Нифталиев, Р. М. Виды древесных плит и их применение / Р. М. Нифталиев, А. А. Побединский // Агропродовольственная политика России. – 2020. – № 4. – С. 40-45. – EDN PALWEG.
2. Чуркина, А. В. Анализ использования фанеры как сырья / А. В. Чуркина // Форум молодых ученых. – 2019. – № 2(30). – С. 1645-1648. – EDN FPFTWH.
3. Hangbo Yue, Lingwei Mai, Chao Xu, Chufen Yang, Peter S. Shuttleworth, Yingde Cui. Recent advancement in bio-based adhesives derived from plant proteins for plywood application: A review. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 2023; 33: 101143. ISSN 2352-5541. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101143>.
4. Yongbo Jia, Bei Luo, Seng Hua Lee, Heming Huang, Zhigang Wu, Bei Zhou, Xiaojian Zhou, Jun Zhang. Facile preparation of high-performance plywood adhesive from gelatinized corn starch crosslinked with ammonium dihydrogen phosphate. *International Journal of Biological Macromolecules* 2024; 256, Part 2: 128548. ISSN 0141-8130. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128548>.
5. Федотов, А. А. Исследование свойств фанеры на основе различных связующих / А. А. Федотов, А. В. Юдин // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2018. – Т. 6, № 3 (39). – С. 284-289. – EDN YPCLXF.
6. Siqi Zheng, Muyang Chen, Jiabiao Wu, Jianying Xu. Effect of heat treatment on properties and interfacial compatibility of poplar veneer/polyethylene film composite plywood. *Polymer Testing*. 2023; 122: 108006. ISSN 0142-9418. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108006>.
7. Абдразакова, А. Р. Экологичность производства фанеры / А. Р. Абдразакова, В. В. Вяткина, С. Н. Кокошин // Инновационные технологии в лесохозяйственной, деревообрабатывающей промышленности

и прикладной механике : Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции, Тюмень, 20 октября 2022 года. – Тюмень: Государственный аграрный университет Северного Зауралья, 2022. – С. 6-9. – EDN VJRPJO.

8. Разработка экологически безопасных клеевых составов для получения фанеры / Д. Н. Николаева, Д. В. Беляева, М. А. Баяндин, А. В. Намятов // Лесной и химический комплексы - проблемы и решения : Сборник материалов по итогам Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 02–04 сентября 2019 года. – Красноярск, 2019. – С. 237-239. – EDN BFHJZZ.

9. Шамаев В.А. Модифицирование древесины : монография / В. А. Шамаев, Н. С. Никулина, И. Н. Медведев ; М-во науки и высшего образования РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2022. – 574 с.

10. Разиньков, Е. М. Анализ допустимого уровня формальдегида в воздухе / Е. М. Разиньков // Современные машины, оборудование и IT-решения лесопромышленного комплекса: теория и практика : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 17 июня 2021 года. – Воронеж, 2021. – С. 299-303. – DOI 10.34220/ММЕITSIC2021\_299-303. – EDN RTVLAZ.

11. Федотов, А. А. Повышение прочностных показателей фанеры ФСФ путем использования модифицирующих добавок к связующему / Т. Н. Вахнина, С. А. Котиков // Лесотехнический журнал. – 2020. – Т. 10, № 1(37). – С. 124-135. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2020.1/13. – EDN KJRKUK.)

12. Русаков, Д. С. Модификация фенолоформальдегидных смол отходами производства алюминия и целлюлозы / Г. С. Варанкина, А. Н. Чубинский // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2019. – № 2(368). – С. 130-140. – DOI 10.17238/issn0536-1036.2019.2.130. – EDN VZPXQW.

13. Kaihong Tang, Ailing Zhang, Tiejun Ge, Xiaofeng Liu, Xiaojun Tang, Yongjiang Li. Research progress on modification of phenolic resin. *Materials Today Communications*. 2021; 26: 101879. ISSN 2352-4928. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101879>.

14. Aydin Demir. Determination of the effect of valonia tannin when used as a filler on the formaldehyde emission and adhesion properties of plywood with artificial neural network analysis. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2023; 123: 103346. ISSN 0143-7496. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103346>.

15. Electra Papadopoulou, Theresa Rücker, Zoe Nikolaidou, Sotirios Kountouras, Themistoklis Sevastiadis, Torbjørn Pettersen, Bernd Wittgens. Electrochemically treated lignin in phenolic resins for plywood panels. *Sustainable Chemistry for the Environment*. 2023; 4: 100049. ISSN 2949-8392. <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2023.100049>.

16. Ali Reza Zanjanijam, Xinyan Wang, Maryam Ramezani, Stefan Holberg, Patrick A. Johnson. Phenolic resin/coal char composites: Curing kinetics and thermal/mechanical performance. *Polymer*. 2023; 281: 126103. ISSN 0032-3861. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2023.126103>.

17. S. Anirudh, K Aruna Prabha, Soppari Bhanu Murthy, B Chennakesava Rao. Enhancement of mechanical properties of matrix by functionalized Multi-Wall Carbon Nanotubes (MWCNT) in composite material. *Materials Today: Proceedings*. 2023; 92, Part2: 1186-1192. ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.308>.

18. Mengjie Wang, Jianfang Yong, Lijuan Cai, Zhaojing Li, Yunfu Ou, Lingzhuang Zhu, Xiaosu Yi, Dongsheng Mao. Significantly improved interfacial and overall mechanical properties of aramid fiber/phenolic resin matrix composite reinforced with short CNT. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023; 26: 5225-5235. ISSN 2238-7854. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.281>.

19. Ющенко, Е. В. Углеродные нанотрубки: перспективы использования в промышленном производстве / Е. В. Ющенко, К. В. Жужукин // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2023. – № 64. – С. 303-308. – EDN XDCATK.

20. Ali Dorieh, Nadir Ayrilmis, Mohammad Farajollah Pour, Sogand Ghafari Movahed, Mohammad Valizadeh Kiamahalleh, Mohammad Hassan Shahavi, Hamid Hatefnia, Meysam Mehdinia. Phenol formaldehyde resin modified by cellulose and lignin nanomaterials: Review and recent progress. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022; 222 Part B: 1888-1907. ISSN 0141-8130. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.09.279>.

21. Жужукин, К. В. Возможности применения нанокристаллической целлюлозы для получения изделий из древесины / К. В. Жужукин, Т. Л. Ищенко, В. О. Кондауров // Подготовка кадров в условиях перехода на инновационный путь развития лесного хозяйства : Научно-практическая конференция, Воронеж, 21–22 октября 2021 года. – Воронеж, 2021. – С. 155-157. – EDN HUSIRF.

22. Шишлов, О. Ф. Лигнинсодержащие фенолкарданолформальдегидные смолы для фанеры и древесностружечных плит / О. Ф. Шишлов, Н. С. Баулина, В. В. Глухих // Деревообрабатывающая промышленность. – 2019. – № 4. – С. 40-45. – EDN WAQNQS.

### References

1. Niftaliev, R. M. Types of wood slabs and their application / R. M. Niftaliev, A. A. Pobedinsky // Agro-food policy of Russia. - 2020. – No. 4. – pp. 40-45. – EDN PALWEG.

2. Churkina, A.V. Analysis of the use of plywood as a raw material / A.V. Churkina // Forum of young scientists. – 2019. – № 2(30). – Pp. 1645-1648. – EDN FPFTWH.

3. Hangbo Yue, Lingwei Mai, Chao Xu, Chufen Yang, Peter S. Shuttleworth, Yingde Cui. Recent advancement in bio-based adhesives derived from plant proteins for plywood application: A review. Sustainable Chemistry and Pharmacy. 2023; 33: 101143. ISSN 2352-5541. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101143>.

4. Yongbo Jia, Bei Luo, Seng Hua Lee, Heming Huang, Zhigang Wu, Bei Zhou, Xiaojian Zhou, Jun Zhang. Facile preparation of high-performance plywood adhesive from gelatinized corn starch crosslinked with ammonium dihydrogen phosphate. International Journal of Biological Macromolecules 2024; 256, Part 2: 128548. ISSN 0141-8130. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128548>.

5. Fedotov, A. A. Investigation of the properties of plywood based on various binders / A. A. Fedotov, A.V. Yudin // Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. - 2018. – Vol. 6, No. 3(39). – pp. 284-289. – EDN YPCLXF.

6. Siqi Zheng, Muyang Chen, Jiabiao Wu, Jianying Xu. Effect of heat treatment on properties and interfacial compatibility of poplar veneer/polyethylene film composite plywood. Polymer Testing. 2023; 122: 108006. ISSN 0142-9418. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108006>.

7. Abdrazakova, A. R. Environmental friendliness of plywood production / A. R. Abdrazakova, V. V. Vyatkina, S. N. Kokoshin // Innovative technologies in forestry, woodworking industry and applied mechanics : Proceedings of the All-Russian Scientific and practical conference, Tyumen, October 20, 2022. – Tyumen: State Agrarian University of the Northern Urals, 2022. – pp. 6-9. – EDN BJJPJO.

8. Development of environmentally safe adhesive compositions for plywood production / D. N. Nikolaeva, D. V. Belyaeva, M. A. Bayandin, A.V. Namyatov // Forest and chemical complexes - problems and solutions : A collection of materials based on the results of the All-Russian scientific and practical conference, Krasnoyarsk, 02-04 September 2019. Krasnoyarsk, 2019. – pp. 237-239. – EDN BFHJZZ.

9. Shamaev V.A. Wood modification : monograph / V.A. Shamaev, N.S. Nikulina I.N. Medvedev ; Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, FGBOU VGLTU. – Voronezh, 2022. – 574 p.

10. Razinkov, E. M. Analysis of the permissible level of formaldehyde in the air / E. M. Razinkov // Modern machines, equipment and IT solutions of the timber industry complex: theory and practice : Materials of the All-Russian Scientific and practical conference, Voronezh, June 17, 2021. – Voronezh, 2021. – pp. 299-303. – DOI 10.34220/MMEITSIC2021\_299-303. – EDN RTVLAZ.

11. Fedotov, A. A. Increasing the strength parameters of FSF plywood by using modifying additives to the binder /, T. N. Vakhnina, S. A. Kotikov // Lesotekhnicheskiiy zhurnal. – 2020. – Vol. 10, No. 1(37). – pp. 124-135. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2020.1/13. – EDN KJRKUK.)

12. Rusakov, D. S. Modification of phenol-formaldehyde resins by waste products of aluminum and cellulose production /, G. S. Varankina, A. N. Chubinsky // News of higher educational institutions. Forest Magazine. – 2019. – № 2 (368). – Pp. 130-140. – DOI 10.17238/issn0536-1036.2019.2.130. – EDN VZPXQW.



13. Kaihong Tang, Ailing Zhang, Tiejun Ge, Xiaofeng Liu, Xiaojun Tang, Yongjiang Li. Research progress on modification of phenolic resin. *Materials Today Communications*. 2021; 26: 101879. ISSN 2352-4928. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101879>.
14. Aydin Demir. Determination of the effect of valonia tannin when used as a filler on the formaldehyde emission and adhesion properties of plywood with artificial neural network analysis. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2023; 123: 103346. ISSN 0143-7496. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103346>.
15. Electra Papadopoulou, Theresa Rücker, Zoe Nikolaidou, Sotirios Kountouras, Themistoklis Sevastiadis, Torbjørn Pettersen, Bernd Wittgens. Electrochemically treated lignin in phenolic resins for plywood panels. *Sustainable Chemistry for the Environment*. 2023; 4: 100049. ISSN 2949-8392. <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2023.100049>.
16. Ali Reza Zanjanijam, Xinyan Wang, Maryam Ramezani, Stefan Holberg, Patrick A. Johnson. Phenolic resin/coal char composites: Curing kinetics and thermal/mechanical performance. *Polymer*. 2023; 281: 126103. ISSN 0032-3861. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2023.126103>.
17. S. Anirudh, K Aruna Prabha, Soppari Bhanu Murthy, B Chennakesava Rao. Enhancement of mechanical properties of matrix by functionalized Multi-Wall Carbon Nanotubes (MWCNT) in composite material. *Materials Today: Proceedings*. 2023; 92, Part2: 1186-1192. ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.308>.
18. Mengjie Wang, Jianfang Yong, Lijuan Cai, Zhaojing Li, Yunfu Ou, Lingzhuang Zhu, Xiaosu Yi, Dongsheng Mao. Significantly improved interfacial and overall mechanical properties of aramid fiber/phenolic resin matrix composite reinforced with short CNT. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023; 26: 5225-5235. ISSN 2238-7854. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.281>
19. Yushchenko, E. V. Carbon nanotubes: prospects for use in industrial production / E. V. Yushchenko, K. V. Zhuzhukin // *Actual problems of the forest complex*. – 2023. – No. 64. – pp. 303-308. – EDN XDCATK.
20. Ali Dorieh, Nadir Ayrilmis, Mohammad Farajollah Pour, Sogand Ghafari Movahed, Mohammad Valizadeh Kiamahalleh, Mohammad Hassan Shahavi, Hamid Hatefnia, Meysam Mehdinia. Phenol formaldehyde resin modified by cellulose and lignin nanomaterials: Review and recent progress. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022; 222 Part B: 1888-1907. ISSN 0141-8130. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.09.279>.
21. Zhuzhukin, K. V. Possibilities of using nanocrystalline cellulose to produce wood products / K. V. Zhuzhukin, T. L. Ishchenko, V. O. Kondaurov // *Personnel training in conditions of transition to an innovative path of forestry development : Scientific and practical conference, Voronezh, October 21-22, 2021. Voronezh: Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 2021. – pp. 155-157. – EDN HUSIRF*.
22. Shishlov, O. F. Lignin-containing phenolcardanolformaldehyde resins for plywood and particle boards / O. F. Shishlov, N. S. Baulina, V. V. Glukhikh // *The woodworking industry*. – 2019. – No. 4. – pp. 40-45. – EDN WAQNQS.

### Сведения об авторах

✉ Ющенко Екатерина Викторовна – аспирант кафедры древесиноведения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: 0000-0002-4827-2756, [katerina.vgltu@yandex.ru](mailto:katerina.vgltu@yandex.ru).

### Information about the authors

✉ *Yushchenko Ekaterina Viktorovna* – postgraduate student of the Department of Wood Science, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: 0000-0002-4827-2756, [katerina.vgltu@yandex.ru](mailto:katerina.vgltu@yandex.ru).

✉ – Для контактов | Corresponding author

# ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал

**2024 Том 14 № 1 (53)**

Подписано в печать 20.03.2024. Формат 60×90 1/8.

Дата выхода в свет 08.04.2024. Цена 1760 р.

Усл. печ. л. 29,88. Уч.-изд. л. 50,57. Тираж 1000 экз. Заказ 135

Издатель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический  
университет имени Г.Ф. Морозова»

Адрес редакции и издателя: ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»

394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8

телефон (473) 253-72-90, факс (473) 253-76-51, e-mail: [lesteh@vglta.vrn.ru](mailto:lesteh@vglta.vrn.ru)

Отпечатано в Участке оперативной полиграфии ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»

394087, г. Воронеж, ул. Докучаева, 10

# LESOTEKHNICHESKII ZHURNAL

Scientific journal

**2024 Vol. 14 № 1 (53)**

Signed to be published 20.03.2024. Format 60×90 1/8.

Publication date 08.04.2024. Price 1760 rub.

Cond. print. sh. 29,88. Acc.-print. sh. 50,57. Printing 1000 copies. Order 135

Publisher: FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies  
named after G.F. Morozov» (FSBEI HE «VSUFT»)

Publisher address: FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies  
named after G.F. Morozov»

Timiryazeva str., 8, Voronezh 394087

phone (473) 253-72-90, fax (473) 253-76-51, e-mail: [lesteh@vglta.vrn.ru](mailto:lesteh@vglta.vrn.ru)

Printed at the Department of Operational Printing

FSBEI HE «VSUFT»

Dokuchaeva str., 10, Voronezh 394087