

ISSN 1993-0135

ХВОЙНЫЕ



БОРЕАЛЬНОЙ ЗОНЫ

2025

Том XLIII
Номер 4

<http://www.sibsau.ru>

Красноярск

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева

ХВОЙНЫЕ БОРЕАЛЬНОЙ ЗОНЫ

Теоретический и научно-практический журнал

Том XLIII
№ 4

Красноярск
2025

ХВОЙНЫЕ БОРЕАЛЬНОЙ ЗОНЫ

Теоретический и научно-практический журнал

Том XLIII, № 4

Журнал основан в 1962 г.
(до 2002 г. носил название «Лиственница»).

Выходит 6 раз в год

Главный редактор

Братилова Наталья Петровна, д.с.-х.н. профессор

Ответственный секретарь

Коротков Александр Анатольевич, к.с.-х.н., доцент

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Авдеева Елена Владимировна, д.с.-х.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Алашкевич Юрий Давыдович, д.т.н., профессор, академик Российской академии образования (РАО) (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Бабич Николай Алексеевич, д.с.-х.н., профессор (САФУ, Архангельск)
Бессчетнов Владимир Петрович, д.б.н., профессор (НГСХА, Нижний Новгород)
Вараксин Геннадий Сергеевич, д.с.-х.н., профессор (Институт леса СО РАН, Красноярск)
Верховец Сергей Владимирович, к.с.-х.н., доцент (проректор по перспективным проектам СФУ, Красноярск)
Выводцев Николай Васильевич, д.с.-х.н., профессор (Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск)
Ермолин Владимир Николаевич, д.т.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Залесов Сергей Вениаминович, д.с.-х.н., профессор (УГЛТУ, Екатеринбург)
Иванов Валерий Александрович, д.с.-х.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Кобаяси Рёсукэ, к.с.-х.н. (Центр полевых биосферных исследований Севера, Университет Хоккайдо)
Казаков Яков Владимирович, д.т.н. (САФУ, Архангельск)
Крутовский Константин Валерьевич, профессор (Техасский агромеханический университет, США)
Кузнецов Борис Николаевич, д.х.н., профессор (ИХХТ СО РАН, Красноярск)
Матвеева Римма Никитична, д.с.-х.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Мельник Пётр Григорьевич, к.с.-х.н., доцент (МГТУ им. Н. Э. Баумана (Национальный исследовательский университет); старший научный сотрудник (Институт лесоведения Российской академии наук)
Муратова Елена Николаевна, д.б.н., профессор (Институт леса СО РАН, Красноярск)
Нагимов Zufar Ягфарович, д.с.-х.н., профессор (УГЛТУ, Екатеринбург)
Нимц Петер, профессор (Институт строительных материалов и физики древесины (IfB) Высшей швейцарской технической школы (ETH), Цюрих, Швейцария)
Огурцов Виктор Владимирович, д.т.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Онучин Александр Александрович, д.б.н., профессор (ИЛ СО РАН, Красноярск)
Пен Роберт Зусьевич, д.т.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Плотников Сергей Михайлович, д.т.н., профессор (ИрГУПС, Красноярск)
Прохоров Валерий Николаевич, д.б.н., профессор, член-корреспондент НАН Беларуси (Институт экспериментальной ботаники НАН Беларуси, Минск, Беларусь)
Рязанова Татьяна Васильевна, д.т.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Сафин Руслан Рушанович, д.т.н., профессор (Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань)
Селиховкин Андрей Витимович, д.б.н., профессор (СПбЛТА им. Кирова, Санкт-Петербург)
Стороженко Владимир Григорьевич, д.б.н. (Институт лесоведения РАН, Москва)
Субоч Георгий Анатольевич, д.х.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Суховольский Владислав Григорьевич, д.б.н., профессор (ИЛ СО РАН, Красноярск)
Усольцев Владимир Андреевич, д.с.-х.н., профессор (УГЛТУ, Екатеринбург)
Хамитов Ренат Салимович, д.с.-х.н., доцент (РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, Москва)
Шевелев Сергей Леонидович, д.с.-х.н. профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Якубов Харис Галиулович, д.б.н., профессор (МГУ, Москва)

CONIFERS of the BOREAL AREA

Theoretical and Applied Research Journal

Volume XLIII, No. 4

The journal was founded in 1962
(Prior to 2002 it had the title «Larch»).

Issued 6 times a year

Editor-In-Chief

Dr. Natalia P. Bratilova, Professor

Executive secretary

PhD. Aleksandr A. Korotkov, Associate Professor

EDITORIAL BOARD:

- Avdeeva** Elena V., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Alashkevich Yuri D., Dr. Sc. in Engineering, Professor, Academician of the Russian Academy of Education (RAO) (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Babich Nikolay A., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Northern Arctic Federal University, Arkhangelsk)
Besschetnov Vladimir P., Dr. Sc. in Biology, Professor (Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, Nizhny Novgorod)
Ermolin Vladimir N., Dr. Sc. in Engineering, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Ivanov Valery A., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Kazakov Yakov V., Dr. Sc. in Engineering, Associate Professor (Northern Arctic Federal University, Arkhangelsk)
Khamitov Renat S., Dr. Sc. in Agriculture, Docent (Russian Timiryazev State Agrarian University, Moscow)
Kobayashi Ryosuke, Cand. Sc. in Agriculture (North Field Biosphere Research Center (Hokkaido University)
Krutovsky Konstantin V., Professor (Texas A&M University, College Station, USA)
Kuznetsov Boris N., Dr. Sc. in Chemistry, Professor (Institute of Chemistry and Chemical Technology, Krasnoyarsk)
Matveeva Rimma N., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Melnik Pyotr G., Cand. Sc. in Agriculture, Associate Professor (Bauman Moscow State Technical University (National Research University); Senior Researcher (Institute of Forestry of the Russian Academy of Sciences)
Muratova Elena N. Dr. Sc. in Biology (Professor Institute of Forest, Krasnoyarsk)
Nagimov Zufar Ya., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Ural State Forestry University, Ekaterinburg)
Niemz Peter, Professor (Institute for Building Materials and Wood Physics (IfB) at Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, Switzerland)
Ogurtsov Victor V., Dr. Sc. in Engineering, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Onuchin Alexandr A., Dr. Sc. in Biology, Professor (Sukachev Institute of Forest, Krasnoyarsk)
Pen Robert Z., Dr. Sc. in Engineering, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Plotnikov Sergey. M., Dr. Sc. in Engineering, Professor (Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Krasnoyarsk)
Prokhorov Valery V., Dr. Sc. in Biology, Professor, Associate Member of the National Academy of Sciences of Belarus (Institute of experimental botany of NAS of Belarus, Minsk, Belarus)
Ryazanova Tatyana V., Dr. Sc. in Engineering, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Safin Ruslan R., Dr. Sc. in Engineering, Professor (Kazan National Research Technological University, Kazan)
Selikhovkin Andrey V., Dr. Sc. in Biology, Professor (Saint-Petersburg State Forest-Technical Academy)
Shevelev Sergei L., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Storojenko Vladimir G., Dr. Sc. in Biology, Professor (Institute of Forest Sciences, Moscow)
Suboch Georgii A., Dr. Sc. in Chemistry, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)
Soukhovolsky Vladislav G., Dr. Sc. in Biology, Professor (Sukachev Institute of Forest, Krasnoyarsk)
Varaksin Gennady S., Dr. Sc. in Agricultural (Professor Institute of Forest, Krasnoyarsk)
Verkhovets Sergei V., Cand. Sc. in Agriculture, Docent (Vice-Rector for Advanced Projects of SFU, Krasnoyarsk)
Vyvodtsev Nikolay V., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Pacific National University, Khabarovsk)
Usoltsev Vladimir A., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Ural State Forestry University, Ekaterinburg)
Zalesov Sergey V., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Ural State Forestry University, Ekaterinburg)
Yakubov Haris H. Dr. Sc. in Biology, Professor (Moscow State University, Moscow)

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-70531 от 25 июля 2017 г.
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Certificate of Registration as a Mass Media Resource.
Certificate: PI No. FC77-70531, dated 25 July 2017,
given by The Federal Service for Supervision of Communications,
Information Technology and Mass Media

Статьи в журнале публикуются бесплатно после обязательного рецензирования
и при оформлении их в соответствии с требованиями редакции (www.hbz.sibsau.ru).

Журнал выходит 6 раз в год.

Электронная версия журнала представлена на сайте Научной электронной библиотеки
(<http://www.elibrary.ru>) и сайте журнала (<https://hbz.sibsau.ru/>)

При перепечатке или цитировании материалов из журнала
«Хвойные бореальной зоны» ссылка обязательна

Номер подписного индекса в каталоге «Книга-Сервис» Е63087, «Пресса России» 63087

Учредитель и издатель

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева» (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

Адрес учредителя и издателя

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева,
Российская Федерация, 660037, Красноярск,
проспект имени газеты «Красноярский рабочий», 31

Адрес редакции

Российская Федерация, 660049, Красноярск, просп. Мира, 82, каб. ц-01а
Редакция журнала «Хвойные бореальной зоны»
Тел. (391) 222-73-58, e-mail: hbz@sibsau.ru, www.hbz.sibsau.ru

Address: Editorial office of the journal “Conifers of the Boreal Area”
82, Mira Av., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation.
Department of Forest Plantation
Phone: (391) 222-73-58, e-mail: hbz@sibsau.ru, www.hbz.sibsau.ru

Ответственный редактор А. А. Коротков.
Корректор П. С. Бороздов. Оригинал-макет и верстка Л. В. Звонаревой.

Подписано в печать 25.08.2025. Дата выхода в свет 03.10.2025. Формат 70×108/8.
Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 11,62. Уч.-изд. л. 14,7. Тираж 700 экз.
Заказ 3602. С 1159/25. Цена свободная.

Редакционно-издательский отдел СибГУ им. М. Ф. Решетнева.
660037, Красноярский край, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.
E-mail: rio@mail.sibsau.ru. Тел. (391) 291-90-96.

Отпечатано в редакционно-издательском центре СибГУ им. М. Ф. Решетнева.
660049, Красноярский край, г. Красноярск, просп. Мира, 82. Тел. (391) 222-73-28.

Содержание

БИОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ, ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Братилова Н. П., Коновалова Д. А., Коротков А. А., Мантулина А. В. Показатели роста четырехлетнего посадочного материала сосны кедровой сибирской с закрытой и открытой корневой системой	7
Усольцев В. А. Всеобщие модели длины кроны двухвойных сосен	13
Матвеева Р. Н., Буторова О. Ф., Попова С. В., Гришлова М. В., Коростелев А. С., Дырдин С. Н. Изменчивость 8-летних сеянцев сосны кедровой сибирской, выращенных из отселектированных шишек алтайского происхождения	20
Коростелев А. С., Щерба Ю. Е. Репродуктивное развитие 41-летних полусибов сосны кедровой сибирской (<i>Pinus sibirica Du Tour</i>) от плюсовых деревьев, аттестованных по семенной продуктивности	26
Галактионов О. Н., Васильев А. А., Елхова М. А., Кемпи Е. А. Изменение запасов древесины при проведении рубок ухода в молодых лесах Прионежского района Республики Карелия	32
Авдеева Е. В., Кухар И. В. Оценка стабильности развития ассимиляционного аппарата березы повислой методами дендроиндикации (на примере скверов города Красноярск)	40

ТЕХНОЛОГИЯ ЗАГОТОВКИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

Левинский В. Н., Епишков Е. Н. Оценка адекватности математической модели распределения температуры в инфракрасно-вакуумной сушилке	50
Авдеев А. Г., Авдеева Е. В. Разработка импортозамещающего оборудования точного высева семян для выращивания сеянцев с закрытой корневой системой	56

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Алашкевич Ю. Д., Ушаков А. В. Динамика контакта струи суспензии с преградой при размоле растительных полимеров	64
Есякова О. А., Кох Ж. А. Растительные отходы как источник сырья для биотоплива	75
Чернов В. А., Кожухова Н. Ю., Жукова О. П., Войнов Н. А. Контактная ступень диабатической ректификационной колонны	85
Рогова Е. А., Алашкевич Ю. Д., Кожухов В. А. Получение и использование бактериальной целлюлозы в качестве композитного сырья	93
Авторская ссылка	98

Contents

BIOLOGY AND ECOLOGY, FORESTRY

Bratilova N. P., Konovalova D. A., Korotkov A. A., Mantulina A. V. Growth indicators of four-year-old planting material of <i>Pinus sibirica</i> Du Tour with closed and open root systems	7
Usoltsev V. A. Generic crown length models of two-needled pines	13
Matveeva R. N., Butorova O. F., Popova S. V., Grishlova M. V., Korostelev A. S., Dyrdin S. N. Variability of 8-year-old siberian pine seedlings grown from selected cones of altai origin	20
Korostelev A. S., Shcherba Iu. E. Reproductive development of 41-year-old half-stands of siberian cedar pine (<i>Pinus sibirica</i> Du Tour) from plus trees selected by seed productivity	26
Galaktionov O. N., Vasiliev A. A., Elkhova M. A., Kempf E. A. Changes in wood stocks during care cuts in young forests of the Prionezhsky district of the Republic of Karelia	32
Avdeeva E. V., Kukhar I. V. Evaluation of the stability of development of the assimilation apparatus of drooping birch using dendroindication methods (using the example of public gardens in Krasnoyarsk)	40

TECHNOLOGY OF HARVESTING AND MECHANICAL PROCESSING OF WOOD

Levinsky V. N., Epishkov E. N. Assessment of the adequacy of a mathematical model of temperature distribution in an infrared vacuum dryer	50
Avdeev A. G., Avdeeva E. V. Development of import-substituting equipment for precise seeding for growing seedlings with a closed root system	56

CHEMICAL PROCESSING TECHNOLOGY

Alashkevich Yu. D., Ushakov A. V. Dynamics of contact of the suspension jet with an obstacle during grinding of plant polymers	64
Esyakova O. A., Kokh Zh. A. Plant waste as a source of raw materials for bio fuel	75
Chernov V. A., Kozhuhova N. Yu., Zhukova O. P., Voinov N. A. A contact tray for a diabatic distillation column	85
Rogova E. A., Alashkevich Y. D., Kozhukhov V. A. Production and use of bacterial cellulose as a composite raw material	93
Author's link	99

ПОКАЗАТЕЛИ РОСТА ЧЕТЫРЕХЛЕТНЕГО ПОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА СОСНЫ КЕДРОВОЙ СИБИРСКОЙ С ЗАКРЫТОЙ И ОТКРЫТОЙ КОРНЕВОЙ СИСТЕМОЙ*

Н. П. Братилова, Д. А. Коновалова, А. А. Коротков, А. В. Мантулина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31

Аннотация. Проанализированы размеры посадочного материала сосны кедровой сибирской четырехлетнего биологического возраста, выращиваемого с открытой корневой системой без пересадки (сеянцы) и с пересадкой (саженцы), а также с закрытой корневой системой в субстратах разного состава. Выявлено, что посадочный материал к концу четвертого периода вегетации отличается по высоте и диаметру стволика в зависимости от способа выращивания и вида субстрата.

Ключевые слова: сосна кедровая сибирская, сеянцы, саженцы, закрытая корневая система, субстрат, торф, кокосовый субстрат, перлит, вермикулит.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 4, P. 7–12

GROWTH INDICATORS OF FOUR-YEAR-OLD PLANTING MATERIAL OF *PINUS SIBIRICA* DU TOUR WITH CLOSED AND OPEN ROOT SYSTEMS

N. P. Bratilova, D. A. Konovalova, A. A. Korotkov, A. V. Mantulina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

Annotation. The sizes of planting material of *Pinus sibirica* Du Tour of four-year biological age, grown with an open root system without transplantation (seedlings) and with transplantation (saplings), as well as with a closed root system in substrates of different compositions, were analyzed. The planting material differs in height and stem diameter depending on the growing method and type of substrate by the end of the fourth growing season.

Keywords: *Pinus sibirica*, seedlings, saplings, closed root system, substrate, peat, coconut substrate, perlite, vermiculite.

ВВЕДЕНИЕ

Отечественной практике искусственного лесовосстановления насчитывается более трех веков. До недавнего времени при создании искусственных насаждений в качестве посадочного материала чаще всего использовали сеянцы или саженцы с открытой корневой системой. С середины XX века стали все активнее применять посадочный материал с закрытой корневой системой, находящейся внутри кома почвы, брикета или ёмкости с субстратом [20; 21; 29].

Считается, что посадочный материал с закрытой корневой системой обладает рядом преимуществ: позволяет продлить протяженность лесокультурного

сезона, дает возможность освоения труднодоступных участков, сокращает сроки выращивания и снижает эффект послепосадочной депрессии [26]. Сеянцы с закрытой корневой системой можно высаживать на вырубках, гарях, а также нарушенных землях в течение всего периода, когда почва или почвогрунт находятся в незамерзшем состоянии, при этом появляется возможность эффективного использования автоматизации всех технологических процессов [22; 25; 29].

Ряд исследователей отдают предпочтение использованию посадочного материала древесных пород с закрытой корневой системой [10]. Е. В. Жигулин [12] полагает, что растения с закрытой корневой

* Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России на выполнение коллективом научной лаборатории «Селекция древесных растений» проекта «Селекционно-генетические основы формирования целевых насаждений и рационального использования древесных ресурсов Красноярского края (Енисейской Сибири)» (№ FEFE-2024-0013).

системой ни в количественном, ни в качественном отношении ничуть не уступают растениям с открытой корневой системой, имея ряд преимуществ. Н. Е. Проказин с соавторами [6] не обнаружили достоверных различий в приживаемости разного вида (с ОКС и ЗКС) посадочного материала сосны обыкновенной при высадке на вырубке горельников. Л. И. Лугинина и В. П. Бессчетнов [17] считают, что, несмотря на то, что культуры сосны обыкновенной, созданные в республике Татарстан посадочным материалом с закрытой корневой системой, несколько отставали в росте по сравнению с использованием традиционного посадочного материала, однако, могут являться рентабельными для воспроизводства.

Однако ряд авторов для лесовосстановления в некоторых почвенных и климатических условиях отдают предпочтение традиционному посадочному материалу с открытой корневой системой, отмечая его относительно невысокую стоимость и достаточную представленность подобных питомников [28]. А. Н. Гладинев с соавторами [8] в качестве недостатков посадочного материала сосны обыкновенной с ЗКС отмечали закручивание корня и отсутствие годичного прироста в высоту у ряда сеянцев. По их мнению, лучший рост и накопление фитомассы отмечалось у сеянцев с ОКС. Е. М. Ананьев с соавторами [23] указывали, что одной из проблем лесовосстановления посадочным материалом хвойных пород с закрытой корневой системой является их первоначальная приживаемость, так как после высадки такого посадочного материала на постоянное место его корневая система питается преимущественно питательными веществами брикета, а не почвы, что в дальнейшем может привести к гибели культур. Высказано предположение, что причиной невысокой приживаемости посадочного материала с закрытой корневой системой может являться нарушение технологии посадки или ее несовершенство.

S. Grossnickle с соавторами [31] при сравнении посадочного материала с открытой и закрытой корневой системами пришли к выводу, что традиционные саженцы отличаются более крупными побегами, но хуже переносят процессы хранения, транспортировки и пересадки.

Е. М. Романов с соавторами [11] считают, что при подборе вида посадочного материала следует учитывать ряд факторов: доступность лесокультурного объекта, способа обработки почвы, срока посадки.

Актуальной проблемой лесовосстановления остается подбор методик и технологий создания лесных культур древесных пород, наиболее оптимальных для каждого лесорастительного района [2; 9]. Одновременно с внедрением посадочного материала с закрытой корневой системой в лесокультурную практику проводится научный поиск возможных недостатков и достоинств различных применяемых технологий, зависящих от различных условий и факторов выращивания, таких как состав субстрата, размеры и форма кассет, лесорастительные условия и т. п. [11; 14; 19].

Несмотря на то, что некоторые расчеты [3] подтверждают, что создание лесных культур посадочным материалом с ЗКС является экономически выгодным для лесопользователей и государственных органов

управления лесами, тем не менее, себестоимость растений с комом выше, чем традиционных сеянцев в 2–3 раза [16]. Высокие затраты на выращивание посадочного материала с закрытой корневой системой обусловлены дорогостоящим зарубежным оборудованием, необходимостью приобретения торфа или готового субстрата, контейнеров и др. Для достижения максимальной эффективности указанной технологии необходимо стремиться к снижению затрат, повышению качества посадочного материала и ускорению его роста [5].

В настоящее время вопросы выращивания посадочного материала кедровых сосен с открытой корневой системой достаточно полно изучены [1; 15; 18], однако посадочному материалу с закрытой корневой системой уделяется меньшее внимание, чем сосне и ели. А. В. Жигунов [13] писал, что семена кедровых сосен из-за их низкой всхожести лучше не сеять непосредственно в кассеты, а использовать ручную пикировку или брикетирование. О. Ю. Храмова, С. В. Молодцов [30] описывают опыт выращивания сеянцев сосны кедровой сибирской в закрытом грунте в условиях Нижегородской области. О. С. Матвейчук с соавторами [19] отмечали образование более мелких корней у посадочного материала с закрытой корневой системой сосны кедровой сибирской. А. С. Водолеев и др. [7] считают, что использование осадков сточных вод для обогащения органическим веществом способствует микробиологическому насыщению субстратов для выращивания сосны кедровой сибирской. В работах Н. П. Братиловой с соавторами даны рекомендации по выращиванию посадочного материала сосны кедровой сибирской с закрытой корневой системой и возможному применению для интродукции севернее границы ее естественного ареала [4; 24].

Таким образом, для успешного выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой следует учесть множество факторов. Выращивание сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour) с закрытой корневой системой (ЗКС) – перспективное, но пока недостаточно изученное направление. Отсутствие стандартных требований для посадочного материала сосны кедровой сибирской с ЗКС значительно затрудняет процесс, многие вопросы остаются не решенными.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследований явились сеянцы и саженцы сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour), выращиваемые с открытой и закрытой корневой системой. Семена для посева были получены в Емельяновском лесничестве Красноярского края после траншейной стратификации.

В 2021 г. семена были высеяны в открытый грунт на грядки на территории Красноярского лесничества, и в субстрат в стаканчики объемом 200 см³ в оранжевое СибГУ им. М. Ф. Решетнева г. Красноярска.

В течение первого вегетационного периода всходы прорастали на субстратах разного состава [4]. Осенью 2021 года растения, выращиваемые с закрытой корневой системой (ЗКС), и часть сеянцев, растущих с открытой корневой системой (ОКС), были пересажены

в гряды по схеме 25×30 см на территорию Караульного лесничества Учебно-опытного лесхоза СибГУ им. М. Ф. Решетнева г. Красноярск.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По достижении растениями сосны кедровой сибирской четырехлетнего биологического возраста проведен сравнительный анализ их роста. Лучшей сохранностью отличались саженцы, выращиваемые в первый год на субстратах из чистого торфа (верховой нейтральный «Агробалт-садовый», обозначение Т), торфа с добавлением 12 % вермикулита (Т₈₈В₁₂) и торфа с внесением 5 % перлита и 5 % вермикулита (Т₉₀П₅В₅), а также в варианте П_Σ, где основным компонентом субстрата была почва из березняка разнотравного, и К₉₀П₅В₅ (основной компонент смеси – кокосовое волокно, в качестве добавок 5 % перлита и 5 % вермикулита).

Средняя высота растений, выращиваемых с закрытой корневой системой, в конце вегетационного сезона 2024 г. составила 9,0±0,47 см. Текущий прирост в высоту был равен 3,5±0,25 см. Диаметр стволика у шейки корня равнялся 4,0±0,17 мм. Уровень изменчивости изученных показателей от повышенного до очень высокого (табл. 1).

Установлено, что на размеры саженцев сосны кедровой сибирской в четырехлетнем биологическом возрасте оказывал влияние состав субстрата. Большая высота наблюдалась у растений, выращиваемых

в течение первого периода вегетации на кокосовом субстрате с добавлением перлита и вермикулита (вариант К₉₀П₅В₅) и на торфяном субстрате с добавлением вермикулита (вариант Т₈₈В₁₂) – 10,8 и 10,5 см соответственно. Средняя высота растений в остальных вариантах колебалась от 7,9 см до 9,7 см. Средний диаметр стволика также зависел от состава питательной смеси и варьировал в пределах от 3,6 мм до 4,6 мм. Для определения энергии роста молодых растений был подсчитан показатель Д²Н, который варьировал от 1,02 до 2,29 см³ в зависимости от варианта опыта (рис. 1).

В связи с тем, что для сосны кедровой сибирской, выращиваемой с ЗКС, до настоящего времени не разработаны стандартные требования к посадочному материалу, можно рекомендовать использовать посадочный материал, выращиваемый на субстратах вариантов К₉₀П₅В₅, Т₈₈В₁₂ и чистом торфяном субстрате (Т), так как данные растения обладают высоким потенциалом роста (Д²Н).

В конце четвертого периода вегетации сеянцы сосны кедровой сибирской, выращиваемые с открытой корневой системой, имели средние размеры по высоте 17,1±0,71 см, по диаметру стволика у шейки корня – 4,3±0,19 мм. Растения, выращиваемые с ОКС и пересаженные в конце первого периода вегетации в гряды школьного отделения, имели среднюю высоту 11,4±0,30 см, диаметр стволика – 5,3±0,14 мм (табл. 2).

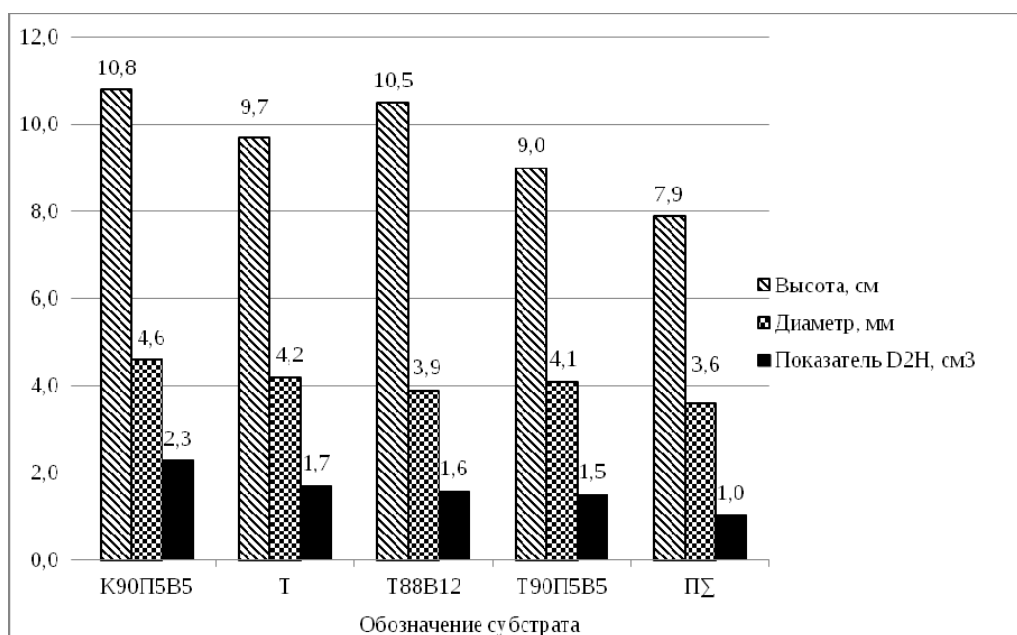


Рис. 1. Размеры четырехлетних растений

Таблица 1
Показатели четырехлетних растений сосны кедровой сибирской

Показатель	X_{cp}	$\pm m$	$\pm \sigma$	P, %	V, %	Уровень изменчивости
Высота, см	9,0	0,47	2,77	5,3	30,9	высокий
Текущий прирост в высоту, см	3,5	0,25	1,46	7,1	41,5	очень высокий
Диаметр стволика, мм	4,0	0,17	1,00	4,3	25,2	повышенный

Таблица 2

Показатели четырехлетних растений сосны кедровой сибирской с ОКС

Показатель	Высота, см		Диаметр стволика, мм	
	саженцы	сеянцы	саженцы	сеянцы
X_{cp}	11,4	17,1	5,3	4,3
$\pm\sigma$	3,3	3,70	1,6	0,99
$\pm m$	0,30	0,71	0,14	0,19
P, %	2,6	4,2	2,7	4,4
V, %	28,7	21,6	30,2	23,1
Уровень изменчивости	повышенный	повышенный	повышенный	повышенный

Проведенные исследования за ростом сеянцев, выращиваемых с открытой корневой системой, позволили установить, что растения, пересаженные в конце первого периода вегетации в школьное отделение по схеме 25×30 см, на четвертый год выращивания имели меньшую высоту, но больший диаметр стволика, чем сеянцы, выращиваемые в посевном отделении без пересадки, преодолевают постпересадочный стресс и достигают стандартных размеров для высадки на лесокультурную площадь.

Таким образом, проведенные исследования показали, что в условиях пригородной зоны Красноярск для лесовосстановления можно использовать четырехлетний посадочный материал сосны кедровой сибирской, выращиваемый как с открытой, так и с закрытой корневой системой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Бабич Н. А., Хамитов Р. С., Хамитова С. М. Се лекция и семенная репродукция кедра сибирского. Вологда-Молочное : Вологодская ГМХА, 2014. 154 с.
2. Барайшук Г. В., Туник Е. А. Выращивание сеянцев сосны сибирской кедровой в условиях Омской области // Состояние и перспективы развития садоводства в Сибири : матер. II Национальной науч.-практ. конф., посв. 85-летию плодового сада Омского ГАУ им. проф. А. Д. Кизюрина. Омск : Омский ГАУ, 2016. С. 171–175.
3. Белякова А. В. Сравнение затрат на лесовосстановление с закрытой и открытой корневой системой // Леса России: политика, промышленность, наука, образование : матер. V Науч.-техн. конф.-вебинара. СПб. : Изд-во СПбГЛТУ, 2020. С. 32–35.
4. Братилова Н. П., Коротков А. А., Коновалова Д. А. Влияние субстрата на рост и развитие сеянцев сосны кедровой сибирской с закрытой корневой системой // Хвойные бореальной зоны. 2022. Т. 40, № 5. С. 347–352.
5. Бобушкина С. В. Приемы повышения эффективности производства посадочного материала хвойных пород с закрытой корневой системой в Архангельской области // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2021. Т. 25, № 6. С. 45–54.
6. Влияние вида посадочного материала на приживаемость сосны обыкновенной на вырубке горельников / Н. Е. Проказин, В. И. Казаков, Е. Н. Лобанова, И. В. Казаков, А. И. Журихин // Мониторинг и биоразнообразие естественных, искусственных и лесомелиоративных систем. Матер. Всерос. научно-практ. конф. 2022. С. 147–153.
7. Водолеев А. С., Ванюгин И. В., Темлянцев Е. Н. Перспективы выращивания сибирского кедра (*Pinus*

sibirica Du Tour) на техногенных территориях Кузбасса // Развитие производительных сил Кузбасса: история, современный опыт, стратегия будущего : Междунар. науч.-практ. конф. Москва : РАН, 2024. С. 334–339.

8. Гладинов А. Н., Коновалова Е. В., Содбоева С. Ч. Сравнительные результаты использования сеянцев сосны обыкновенной с открытой и закрытой корневой системой при искусственном лесовосстановлении в условиях Западного Забайкалья // Успехи современного естествознания, 2021. № 11. С. 7–12.

9. Гуль Л. П. О перспективности посадочного материала с закрытыми корнями на Дальнем Востоке // Использование и воспроизводство лесных ресурсов на Дальнем Востоке : тр. ФБУ «ДальНИИЛХ», 2016. Вып. 39. С. 74–82.

10. Дебков Н. М., Паневин В. С. Искусственное восстановление кедровых лесов Томской области // ИВУЗ. Лесной журнал. 2019. № 2. С. 9–21.

11. Дифференцированное применение посадочного материала при создании лесных культур / Е. М. Романов, А. Е. Самосудов, Т. В. Нуреева, М. В. Бекмансуров // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование, 2023. № 2(58). С. 6–29.

12. Жигулин Е. В. Опыт создания лесных культур сеянцами с закрытой корневой системой на гарях Алтайского края. Екатеринбург : Урал. гос. лесотехн. универ. // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. № 12. С. 125–130.

13. Жигунов А. В. Теория и практика выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой. СПб. : СПб НИИЛХ, 2000. 293 с.

14. Зоткина Т. А., Костырко А. Н. Выращивание посадочного материала с закрытой корневой системой: проблемы и перспективы // Лесные экосистемы: состояние, проблемы и пути их решения в современных условиях : матер. Междунар. науч.-практ. конф., посв. 65-летию Института лесного и лесопаркового хозяйства. Уссурийск : ФГБОУ ВО «Приморский ГАУ», 2023. С. 22–25.

15. Ипатов Л. Ф. Кедр на Севере : научно-популярные очерки // Арханг. регион. обществ. фонд «Музей леса им. засл. лесовода РФ А. Ф. Заволожина. Архангельск, 2011. 412 с.

16. Корчагов С. А., Грибов С. Е., Обрядина О. Ю. Экономическая оценка создания лесных культур различным видом посадочного материала // ИВУЗ. Лесной журнал. 2017. № 5. С. 92–102.

17. Лугинина Л. И., Бессчетнов В. П. Эффективность применения посадочного материала с закрытой корневой системой при создании лесных культур со-

сны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в Республике Татарстан // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг. 2017. № 3. С. 46–54.

18. Матвеева Р. Н., Буторова О. Ф. Агротехника выращивания кедра сибирского в питомниках // Хвойные бореальной зоны. 2006. Т. 23, № 3. С. 37–43.

19. Матвейчук О. С., Третьякова Р. А., Паркина О. В. Динамика развития саженцев сосны кедровой сибирской с разным типом корневой системы // Роль аграрной науки в устойчивом развитии сельских территорий : матер. VIII Всерос. (нац.) науч. конф. с междунар. участием. 20 декабря 2023 г. Новосибирск, 2023. С. 85–88.

20. Мерзленко М. Д. Актуальные аспекты искусственного лесовосстановления // Ивуз. Лесной журнал. 2017. № 3. С. 22–30.

21. Морковина С. С., Драпалюк М. В., Баранова Е. В. Инновационные технологии в лесокультурном деле: реальность и перспективы // Лесотехнический журнал. 2015. Т. 5, № 3 (19). С. 327–338.

22. Оплетаев А. С., Жигулин Е. В., Залесов С. В. Опыт многоротационного выращивания контейнерного посадочного материала для искусственного лесовосстановления в теплицах с регулируемым микроклиматом // Хвойные бореальной зоны. 2023. Т. 41, № 2. С. 152–157.

23. Опыт выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой в Алтайском крае / Е. М. Ананьев, С. В. Залесов, Н. А. Луганский, Д. А. Шубин, А. Е. Осипенко // Аграрный вестник Урала. 2017. № 8 (162). С. 4–10.

24. Перспективы выращивания сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour) в условиях Крайнего Севера / Н. П. Братилова, Ю. Е. Щерба, А. В. Мантулина, Д. А. Коновалова // Хвойные бореальной зоны. 2024. Т. 42, № 2. С. 38–44.

25. Приживаемость сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в ленточных борах Алтайского края / Е. М. Ананьев, Д. А. Шубин, А. Е. Осипенко, Н. А. Луганский, О. В. Толкач // Актуальные проблемы устойчивого развития лесного комплекса : труды Междунар. науч.-практ. конф., посв. 70-летию высшего лесного образования в Казахстане. Алматы. 2018. С. 56–59.

26. Приходько О. Ю. Выращивание сеянцев основных лесобразующих пород с закрытой корневой системой на различных субстратах в условиях Приморского края // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В. Р. Филиппова. 2024. № 2(75). С. 107–113.

27. Технологические приемы выращивания сеянцев хвойных пород и проблемы в лесных питомниках открытого грунта таежной зоны европейской части России / Н. А. Демина, В. В. Воронин, А. А. Парамонов, Д. Х. Файзулин, Е. М. Романов, О. Н. Тюкавина // Актуальные проблемы развития лесного комплекса : матер. XX Междунар. науч.-техн. конф. 2022. С. 25–28.

28. Трещевская Э. И., Цепляев А. Н. Влияние цвета контейнера на рост посадочного материала *Thuja occidentalis* ‘smaragd’ // Лесотехнический журнал. 2020. Т. 10, № 2 (38). С. 103–113.

29. Хабибуллина Г. Р., Байтурина Р. Р. Практика выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой как перспективная технология

лесовосстановления // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса : матер. XIV Междунар. науч.-техн. конф. Екатеринбург : ФГБОУ ВПО «УГЛТУ». 2023. С. 257–261.

30. Храмова О. Ю., Молодцов С. В. Выращивание сеянцев сосны кедровой сибирской с закрытой корневой системой в закрытом грунте Семеновского спецсемлесхоза // Лесоводство Нижегородской области на рубеже веков : сборник научных трудов по материалам научно-практической конференции. 2004. С. 192–197.

31. Grossnickle S., El-Kassaby Y. A. Bareroot versus container stocktypes: a performance comparison // New Forests. 2015. Vol. 41. P. 1–51.

REFERENCES

1. Babich N. A., Xamitov R. S., Xamitova S. M. Selekcija i semennaya reprodukcija kedra sibirskogo. Vologda-Molochnoe : Vologodskaya GMXA, 2014. 154 s.

2. Barajshhuk G. V., Tunik E. A. Vy'rashhivanie seyancev sosny' sibirskoj kedrovoj v usloviyax Omskoj oblasti // Sostoyanie i perspektivy' razvitiya sadovodstva v Sibiri : mater. II Nacional'noj nauch.-prakt. konf., posv. 85-letiyu plodovogo sada Omskogo GAU im. prof. A. D. Kizyurina. Omsk : Omskij GAU, 2016. S. 171–175.

3. Belyakova A. V. Sravnenie zatrat na lesovosstanovlenie s zakry'toj i otkry'toj kornevoj sistemoy // Lesa Rossii: politika, promy'shlennost', nauka, obrazovanie : mater. V nauch.-texn. konf.-vebinara. SPb. : Izd-vo SPbGLTU, 2020. S. 32–35.

4. Bratilova N. P., Korotkov A. A., Konovalova D. A. Vliyanie substrata na rost i razvitie seyancev sosny' kedrovoj sibirskoj s zakry'toj kornevoj sistemoy // Xvojny'e boreal'noj zony'. 2022. T. 40, № 5. S. 347–352.

5. Bobushkina S. V. Priemy' povy'sheniya e'ffektivnosti proizvodstva posadochnogo materiala xvojny'x porod s zakry'toj kornevoj sistemoy v Arxangel'skoj oblasti // Lesnoj vestnik. Forestry Bulletin. 2021. T. 25, № 6. S. 45–54.

6. Vliyanie vida posadochnogo materiala na prizhivayemost' sosny' oby'knovennoj na vy'rubke gorel'nikov / N. E. Prokazin, V. I. Kazakov, E. N. Lobanova, I. V. Kazakov, A. I. Zhurixin // Monitoring i bioraznoobrazie estestvenny'x, iskusstvenny'x i lesomeliorativny'x sistem : mater. Vseros. nauch.-prakt. konf. 2022. S. 147–153.

7. Vodoleev A. S., Vanyugin I. V., Temlyanceva E. N. Perspektivy' vy'rashhivaniya sibirskogo kedra (*Pinus sibirica* Du Tour) na texnogenny'x territoriyax Kuzbassa // Razvitie proizvoditel'ny'x sil Kuzbassa: istoriya, sovremenny'j opyt, strategiya budushhego : mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Moskva : RAN, 2024. S. 334–339.

8. Gladinov A. N., Konovalova E. V., Sodboeva S. Ch. Sravnitel'ny'e rezul'taty' ispol'zovaniya seyancev sosny' oby'knovennoj s otkry'toj i zakry'toj kornevoj sistemoy pri iskusstvennom lesovosstanovlenii v usloviyax Zapadnogo Zabajkal'ya // Uspexi sovremennogo estestvoznaniya, 2021. № 11. S. 7–12.

9. Gul' L. P. O perspektivnosti posadochnogo materiala s zakry'ty'mi kornyami na Dal'nem Vostoke // Ispol'zovanie i vosproizvodstvo lesny'x resursov na Dal'nem Vostoke : tr. FBU «Dal'NIILX», 2016. Vy'p. 39. S. 74–82.

10. Debkov N. M., Panevin V. S. Iskusstvennoe vosstanovlenie kedrovyykh lesov Tomskoj oblasti // IVUZ. Lesnoj zhurnal. 2019. № 2. S. 9–21.

11. Differencirovannoe primeneniye posadochnogo materiala pri sozdaniy lesnykh kul'tur / E. M. Romanov, A. E. Samosudov, T. V. Nureeva, M. V. Bekmansurov // Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. E'kologiya. Prirodopol'zovanie, 2023. № 2(58). S. 6–29.

12. Zhigulin E. V. Opyt sozdaniya lesnykh kul'tur seyanczami s zakrytoy kornevoy sistemoy na garyakh Altajskogo kraja. Ekaterinburg : Ural. gos. lesotexn. univer. // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. 2019. № 12. S. 125–130.

13. Zhigunov A. V. Teoriya i praktika vy'rashhivaniya posadochnogo materiala s zakrytoy kornevoy sistemoy. SPb. : SPb NIILX, 2000. 293 s.

14. Zotkina T. A., Kostyrko A. N. Vy'rashhivaniye posadochnogo materiala s zakrytoy kornevoy sistemoy: problemy i perspektivy // Lesnye ekosistemy: sostoyaniye, problemy i puti ix resheniya v sovremennykh usloviyakh : mater. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posv. 65-letiyu Instituta lesnogo i lesoparkovogo khozyajstva. Ussurijsk : FGBOU VO Primorskij GATU. 2023. S. 22–25.

15. Ipatov L. F. Kedr na Severe: nauchno-populyarnyye ocherki // Arxang. region. obshhestv. fond «Muzej lesa im. zasl. lesovoda RF A. F. Zavolozhina. Arxangel'sk, 2011. 412 c.

16. Korchagov S. A., Gribov S. E., Obryadina O. Yu. E'konomicheskaya ocenka sozdaniya lesnykh kul'tur razlichnykh vidom posadochnogo materiala // IVUZ. Lesnoj zhurnal. 2017. № 5. S. 92–102.

17. Luginina L. I., Besschetnov V. P. E'ffektivnost' primeneniya posadochnogo materiala s zakrytoy kornevoy sistemoy pri sozdaniy lesnykh kul'tur sosny obyknovnoy (Pinus sylvestris L.) v respublike Tatarstan // Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distancionnyj monitoring. 2017. № 3. S. 46–54.

18. Matveeva R. N., Butorova O. F. Agrotehnika vy'rashhivaniya kedra sibirskogo v pitomnikakh // Xvoynye boreal'noj zony. 2006. T. 23, № 3. S. 37–43.

19. Matvejchuk O. S., Tret'yakova R. A., Parkina O. V. Dinamika razvitiya sazhencev sosny kedrovoj sibirskoj s raznykh tipom kornevoy sistemy // Rol' agrarnoy nauki v ustojchivom razvitiy sel'skix territorij : mater. VIII Vseros. (nacz.) nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem. 20 dekabrya 2023 g. Novosibirsk, 2023. S. 85–88.

20. Merzlenko M. D. Aktual'nyye aspekty iskusstvennogo lesovosstanovleniya // Ivuz. Lesnoj zhurnal. 2017. № 3. S. 22–30.

21. Morkovina S. S., Drapalyuk M. V., Baranova E. V. Innovacionnyye tekhnologii v lesokul'turnom dele: real'nost' i perspektivy // Lesotekhnicheskij zhurnal. 2015. T. 5, № 3 (19). S. 327–338.

22. Opletaev A. S., Zhigulin E. V., Zalesov S. V. Opyt mnogorotacionnogo vy'rashhivaniya kontejnernogo posadochnogo materiala dlya iskusstvennogo lesovosstanov-

leniya v tepliczakh s reguliruemym mikroklimatom // Xvoynye boreal'noj zony. 2023. T. 41, № 2. S. 152–157.

23. Opyt vy'rashhivaniya posadochnogo materiala s zakrytoy kornevoy sistemoy v Altajskom krae / E. M. Anan'ev, S. V. Zalesov, N. A. Luganskij, D. A. Shubin, A. E. Osipenko // Agrarnyj vestnik Urala. 2017. № 8 (162). S. 4–10.

24. Perspektivy vy'rashhivaniya sosny kedrovoj sibirskoj (Pinus sibirica Du Tour) v usloviyakh Krajnego Severa / N. P. Bratilova, Yu. E. Shherba, A. V. Mantulina, D. A. Konovalova // Xvoynye boreal'noj zony. 2024. T. 42, № 2. S. 38–44.

25. Prizhivaemost' seyancev sosny obyknovnoy (Pinus sylvestris L.) v lentochnykh borax Altajskogo kraja / E. M. Anan'ev, D. A. Shubin, A. E. Osipenko, N. A. Luganskij, O. V. Tolkach // Aktual'nyye problemy ustojchivogo razvitiya lesnogo kompleksa : trudy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posv. 70-letiyu vysshego lesnogo obrazovaniya v Kazaxstane. Almaty, 2018. S. 56–59.

26. Prihodko O. Yu. Vy'rashhivaniye seyancev osnovnykh lesoobrazuyushchix porod s zakrytoy kornevoy sistemoy na razlichnykh substratax v usloviyakh Primorskogo kraja // Vestnik Buryatskoj gosudarstvennoj sel'skoxozyajstvennoj akademii im. V. R. Filippova. 2024. № 2(75). S. 107–113.

27. Tekhnologicheskie priemy vy'rashhivaniya seyancev xvoynykh porod i problemy v lesnykh pitomnikakh otkrytogo grunta taezhnoj zony evropejskoj chasti Rossii / N. A. Demina, V. V. Voronin, A. A. Paramonov, D. X. Fajzulin, E. M. Romanov, O. N. Tyukavina // Aktual'nyye problemy razvitiya lesnogo kompleksa : mater. XX Mezhdunar. nauch.-texn. kon. 2022. S. 25–28.

28. Treshhevskaya E. I., Ceplyaev A. N. Vliyanie cveta kontejnera na rost posadochnogo materiala Thuja occidentalis 'smaragd' // Lesotekhnicheskij zhurnal. 2020. T. 10, № 2 (38). S. 103–113.

29. Xabibullina G. R., Bajturina R. R. Praktika vy'rashhivaniya posadochnogo materiala s zakrytoy kornevoy sistemoy kak perspektivnaya tekhnologiya lesovosstanovleniya // E'ffektivnyj otvet na sovremennyye vyzovy s uchedom vzaimodejstviya cheloveka i prirody, cheloveka i tekhnologij: social'no-ekonomicheskie i ekologicheskie problemy lesnogo kompleksa : mater. XIV Mezhdunar. nauchno-texn. konf. Ekaterinburg : FGBOU VPO UGLTU. 2023. S. 257–261.

30. Xramova O. Yu., Molodtsov S. V. Vy'rashhivaniye seyancev sosny kedrovoj sibirskoj s zakrytoy kornevoy sistemoy v zakrytom grunte Semenovskogo speczsemlesxozha // Lesovodstvo Nizhegorodskoj oblasti na rubezhe vekov : sbornik nauchnykh trudov po materialam nauchno-prakticheskoy konferencii. 2004. S. 192–197.

31. Grossnickle S., El-Kassaby Y. A. Bareroot versus container stocktypes: a performance comparison // New Forests. 2015. Vol. 41. P. 1–51.

© Брати́лова Н. П., Коно́валова Д. А., Коротков А. А., Манту́лина А. В., 2025

ВСЕОБЩИЕ МОДЕЛИ ДЛИНЫ КРОНЫ ДВУХВОЙНЫХ СОСЕН***В. А. Усольцев**

Уральский государственный лесотехнический университет
 Российская Федерация, 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37
 Уральский государственный экономический университет
 Российская Федерация, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта/ Народной Воли, 62/45
 E-mail: Usoltsev50@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0003-4587-8952>

Аннотация. Морфология крон деревьев определяет масштаб и эффективность физиологических процессов, в частности, фотосинтеза, дыхания и транспирации, определяющих рост и развитие дерева, а также качество древесины. Поэтому исследователи фокусируются на разработке моделей таких морфологических характеристик, как длина кроны, относительная длина кроны (кроновое отношение) и высота ее крепления на стволе. Морфологические характеристики кроны служат в качестве прогностических переменных в моделях диаметра кроны, ее вертикального профиля, биомассы дерева, а также верховых пожаров. Цель настоящего исследования – по материалам авторской базы данных для двухвойных сосен Евразии построить всеобщие модели для оценки длины кроны, кронового отношения и высоты крепления кроны по легко измеряемым дендрометрическим характеристикам дерева. Для достижения поставленной цели из авторской базы данных отобрано 2700 модельных деревьев с измеренными таксационными показателями. Поскольку исследование имеет континентальный уровень, анализ выполнен на уровне подрода двухвойных сосен как совокупности викарирующих видов, имея в виду, что ни один вид не произрастает на территории всей Евразии. В результате построены всеобщие многофакторные модели для оценки морфологических показателей кроны – длины кроны, кронового отношения и высоты крепления кроны – по диаметру ствола на высоте груди, высоте и возрасту дерева, объясняющие от 52 до 88 % изменчивости того или иного морфологического показателя кроны, а их регрессионные коэффициенты при независимых переменных значимы на уровне вероятности $p < 0,001$ и выше. Предложенные многофакторные модели для оценки морфологических показателей кроны по известным дендрометрическим характеристикам дерева могут быть использованы в динамических моделях роста деревьев и древостоев, при разработке моделей биомассы деревьев и древостоев, а также при моделировании верховых лесных пожаров.

Ключевые слова: морфология кроны, длина кроны, кроновое отношение, высота крепления кроны, многофакторные модели, дендрометрические независимые переменные, мультиколлинеарность факторов.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 4, P. 13–19

GENERIC CROWN LENGTH MODELS OF TWO-NEEDED PINES****V. A. Usoltsev**

Ural State Forest Engineering University
 37, Siberian tract, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation
 Ural State University of Economics
 62/45, 8 Marta/ Narodnaya Volya str., Yekaterinburg, 620144

Annotation. The morphology of tree crowns determines the scale and effectiveness of physiological processes, in particular, of photosynthesis, respiration and transpiration, which determine the growth and development of a tree, as well as the quality of wood. Therefore, researchers are focusing on developing models of such morphological characteristics as crown length, relative crown length, and height to crown base. The morphological characteristics of the crown serve as predictive variables in models of crown diameter, vertical profile, tree biomass, and crown fires. The purpose of this study is to build generic models for estimating crown length, relative crown length (crown ratio) and height to crown base based on easily measurable dendrometric characteristics of the tree based on the materials of the author's database for two-needled pines (subgenus *Pinus* L.) of Eurasia. To achieve this goal, 2,700 model trees with

* * Работа выполнена в рамках тематики научных исследований Уральского государственного лесотехнического университета.

** The work was carried out within the framework of the scientific research themes of the Ural State Forest Engineering University.

measured taxation indicators were selected from the author's database. Since the study has a continental level, the analysis was performed at the level of a subgenus of two-needled pines as a set of vicarious species, bearing in mind that no species grows throughout Eurasia. As a result, generic multiple models were built to evaluate the morphological parameters of the crown – crown length, crown ratio and height to crown base – by stem diameter at breast height, height and age of the tree, explaining from 52 to 88 % of the variability of a particular morphological index of the crown, and their regression coefficients for independent variables are significant at the probability level $p < 0.001$ and higher. The proposed multiple models for estimating the morphological parameters of the crown based on the known dendrometric characteristics of the tree can be used in dynamic models of tree and stand growth, in the development of biomass models of trees and stands, as well as in the modeling of crown fires.

Keywords: crown morphology, crown length, crown ratio, crown attachment height, multiple models, dendrometric independent variables, multicollinearity of factors.

ВВЕДЕНИЕ

С экономической и экологической точек зрения двухвойные сосны (подрод *Pinus* L.) занимают второе место по своему ареалу среди всех хвойных пород северного полушария [18]. Размер, структура и форма крон деревьев определяют масштаб и эффективность физиологических процессов, главным образом фотосинтеза, дыхания и транспирации, определяющих рост и развитие дерева. Поэтому исследовательские работы начали фокусироваться на разработке моделей таких характеристик, как длина кроны (Lcr), относительная длина кроны (Lcr/H – отношение длины кроны к высоте дерева, или кроновое отношение) и высота крепления кроны (Hcr – разность между высотой дерева и длиной кроны) (height to crown base, height of first branch, green crown height, crown rise, crown height).

Длина кроны дерева имеет большое значение в методологии селекционных исследований [16]. Это связано с тем, что от нее зависят как рост дерева, так и качество древесины [41]. От Lcr зависит также ветроустойчивость дерева [25]. На Lcr сильно влияет густота, или количество деревьев на единицу площади: чем больше густота, тем меньше Lcr [7; 13; 38]. Густота ограничивает Lcr и, следовательно, скорость роста всего дерева [11; 21]. Показатель Lcr во многом определяет прирост деревьев [37] и используется в динамических моделях их роста [30]. Однако прямые измерения Lcr могут быть затруднены, если она неправильной формы, особенно в густых насаждениях, и необходимы корректные модели для ее оценки [33; 34; 37].

Относительная длина кроны (Lcr/H) изменяется от 1,0, когда $Hcr = 0$, и стремится к нулевому значению по мере отмирания кроны у угнетенного дерева вследствие конкуренции [14]. Величина Lcr/H является косвенным показателем фотосинтетической способности, физиологического состояния дерева, качества древесины [16; 19; 20] и связана с густотой и размерами деревьев [9; 36]. Однако измерение Lcr/H в лесном насаждении довольно трудоемко, и необходима разработка корректных моделей Lcr/H деревьев, в частности, для более точной оценки их биомассы [14].

Высота крепления кроны, или высота кроны (Hcr) служит в качестве прогностической переменной в моделях диаметра кроны [8], ее профиля [10], биомассы дерева [28], а также верховых пожаров [23]. Величина Hcr связана с длиной кроны, высотой дерева,

диаметром на высоте груди, соотношением диаметра и высоты ствола, коэффициентом конкуренции крон и площадью сечений древостоя [26; 27; 32; 40]. Однако измерение Hcr является дорогостоящим и трудоемким процессом, что приводит к трудностям в практическом применении. Техника воздушного лазерного сканирования дает возможность упростить процедуру измерения Hcr в лесных насаждениях [22]. Тем не менее, для решения названной проблемы необходима разработка ее высокоточных моделей [32; 39].

Модели размера кроны обычно основаны на аллометрических зависимостях с легко измеряемыми параметрами ствола, такими как высота дерева (H) и диаметр ствола на уровне груди (D). Использование этих двух биометрических параметров для моделирования обусловлено тем, что масса ассимиляционного аппарата крон определяет рост деревьев в высоту и толщину [6; 15; 16; 30; 41]. Однако подобные уравнения могут приводить к завышению размера кроны в густых насаждениях и занижению его в редкостойных, и предлагается добавлять в модель параметры, связанные с конкуренцией деревьев, например, учитывать их густоту [17; 24; 29; 30; 31; 34].

В Польше по данным 300 модельных деревьев, взятых на 20 пробных площадях в насаждениях сосны обыкновенной второго класса возраста, была исследована связь Lcr с диаметром ствола, высотой дерева и относительной густотой, представляющей отношение фактической густоты к густоте нормальных насаждений, характеризующаяся значениями R^2 соответственно 0,62; 0,52 и 0,76 [33]. Однако мультиколлинеарность независимых переменных оказалась довольно высокой, в частности, коэффициент корреляции между диаметром и высотой составил 0,85. Поскольку связь Lcr с диаметром и высотой ствола была положительной, а с относительной густотой – отрицательной, для моделирования Lcr была предложена комбинированная переменная, представляющая произведение диаметра и высоты ствола, деленное на относительную густоту. В логарифмированном выражении названная комбинированная переменная отражает положительную связь с диаметром и высотой ствола и отрицательную – с относительной густотой. Но в таком случае коэффициент регрессии при каждой из них представляет одну и ту же величину. т. е. предполагается, что вклады каждой из трех переменных в объяснение изменчивости Lcr одинаковые. Расчет показал, что связь Lcr с комбинированной переменной характеризуется значением R^2 , равным 0,76,

т. е. объясняющая способность комбинированной переменной оказалась одинаковой с объясняющей способностью одной только относительной густоты деревьев [33].

Поскольку назначение и роль каждой из трех характеристик кроны, связанных с ее длиной, а именно, Lcr , Lcr/H и Hcr , в упомянутых выше моделях в качестве независимых переменных имеют специфичный характер, в настоящем исследовании названные три характеристики кроны исследованы отдельно.

Цель настоящего исследования – по материалам авторской базы данных для двухвойных сосен Евразии построить всеобщие модели для Lcr , Lcr/H и Hcr .

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для достижения поставленной цели из авторской базы данных [3] отобрано 2700 модельных деревьев двухвойных сосен с измеренными таксационными показателями. Характеристика исходных дендрометрических показателей дана в табл. 1. Поскольку исследование имеет континентальный уровень, анализ проводится на уровне подрода *Pinus* L. как совокупности викарирующих видов, имея в виду, что ни один вид не произрастает на территории всей Евразии.

Поскольку исходные данные варьируют в диапазоне возрастов от 7 до 186 лет (табл. 1), структура аллометрической модели для оценки морфологических характеристик кроны, помимо выше упомянутых диаметра ствола, его высоты и густоты, должна включать возраст дерева. В результате принятая структура модели имеет первоначальный вид

$$\ln Y = a_0 + a_1(\ln D) + a_2(\ln H) + a_3(\ln A) + a_4(\ln N), \quad (1)$$

где Y – один из морфологических показателей кроны (Lcr , Lcr/H или Hcr).

Поскольку переменные D , H и A в широком диапазоне экологических условий взаимно коррелируют, необходима их проверка на мультиколлинеарность по коэффициенту инфляции дисперсии (Variance Inflation Factor, VIF) [5], допускаемое значение которого принято считать равным 5,0 [2].

Проверка четырех переменных модели (1) была выполнена на основе программы Python (<https://www.reneshbedre.com/blog/variance-inflation-factor.html>), и оказалось, что наименьшим значением VIF характеризуется переменная N ($VIF = 1,1$), а остальные три взаимно коррелируют на уровне VIF от 8 до 21. Дальнейший анализ переменных показал, что VIF для переменной N остается во всех случаях равным 1,1. Парные же корреляции дендрометрических переменных (A с D , A с H , D с H) по величине VIF составили соответственно 6,5; 7,9 и 16,5, что выше допускаемого значения. Это означает, что по условию мультиколлинеарности в модель (1) можно включать перемен-

ную N и лишь один из трех дендрометрических показателей: D , H или A . Однако расчет соответствующих моделей показал, что переменная N во всех случаях статистически не значима на уровне вероятности $p < 0,05$, и критерий Стьюдента составил при переменной N в моделях для Lcr , Lcr/H и Hcr соответственно 0,9; 0,3 и 1,1, что существенно меньше $t_{\text{табл}}$, равного 1,96.

Таким образом, по условиям мультиколлинеарности, – с одной стороны, и статистической значимости независимых переменных, – с другой стороны, в модель (1) можно включать лишь один из дендрометрических показателей (D , H или A). Но подобные однофакторные модели будут давать неприемлемые смещения при использовании их на объектах, характеризуемых крайними значениями неучтенных дендрометрических показателей [4]. Поэтому дальнейший анализ модели (1) выполняется при исключенной переменной N , и конечный вид модели (1) будет определяться уровнями статистической значимости дендрометрических переменных D , H и A .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По фактическим исходным данным, характеристика которых приведена в табл. 1, рассчитана модель (1) с исключенной из анализа переменной $\ln N$, и результаты расчета даны в табл. 2.

Все регрессионные коэффициенты при независимых переменных моделей (1) оказались значимыми на уровне вероятности $p < 0,001$ и выше (табл. 2), что означает, что возраст дерева, его диаметр и высота оказывают в высшей степени значимое влияние на величину каждого их морфологических показателей кроны. Необходимо отметить, что модели для Lcr и Lcr/H являются взаимозаменяемыми. Достаточно в модели для $\ln(Lcr/H)$ раскрыть скобки выражения и перенести $\ln H$ в правую часть модели, чтобы получить модель для $\ln Lcr$.

Выше отмечалось, что при моделировании Lcr в 30-летних сосняках Польши комбинированная переменная объясняла 76 % изменчивости Lcr , т. е. ровно столько же, сколько относительная густота. В нашем примере фигурирует не относительная, а абсолютная густота, поскольку неизвестно, существуют ли таблицы хода роста нормальных древостоев двухвойных сосен в масштабах континента. Далее выполнен регрессионный анализ аллометрической зависимости каждого из морфологических показателей кроны с комбинированной переменной, представленной произведением диаметра и высоты ствола, деленным на густоту. Полученные модели для Lcr , Lcr/H и Hcr характеризуются коэффициентами детерминации соответственно 0,610; 0,139 и 0,547, что существенно ниже по сравнению с такими же коэффициентами моделей, представленных в табл. 2.

Таблица 1
Диапазоны фактических исходных данных 2700 деревьев двухвойных сосен

A , лет	D , см	H , м	N , деревьев/га	Lcr , м	Lcr/H	Hcr , м
7–186	0,9–55,0	1,4–36,6	130–82400	0,7–21,4	0,12–1,0	0–19,5

Таблица 2
Характеристика моделей (1) с исключенной переменной $\ln N$

Зависимая переменная	Константы модели					$\text{adj}R^2$	SE
	a_0	$a_1 \ln A$	$a_2 \ln H$	$a_3 (\ln H)^2$	$a_4 \ln D$		
$\ln Lcr$	0,4190	–0,1042/7,2	0,1095/4,4	–	0,5656/33,4	0,761	0,260
$\ln (Lcr/H)$	0,4190	–0,1042/7,2	–0,8905/35,7	–	0,5656/33,4	0,520	0,260
$\ln Hcr$	–3,8122	0,2234/11,0	3,4285/46,2	–0,2644/17,1	–0,8014/34,7	0,883	0,353

Примечания. Свободный член a_0 модели скорректирован на логарифмическую трансформацию [35]; $\text{adj}R^2$ – коэффициент детерминации, скорректированный на количество переменных; SE – стандартная ошибка модели. В числителе – регрессионные коэффициенты при независимых переменных, в знаменателе – их значимость по Стьюденту.

Поводом для использования комбинированной переменной было сомнительное желание исключить взаимную корреляцию составляющих ее величин. В частности, это касалось такой комбинированной переменной, как D^2H [12], которая по способности объяснять изменчивость биомассы кроны оказывается ниже, чем только диаметр D . В финальном варианте моделей (1), представленных в табл. 2, взаимная корреляция переменных неизбежно существует, и обусловлена она спецификой пассивного эксперимента [1]. Тем не менее, комбинированная переменная по сравнению с переменными модели (1) имеет худшую объяснительную способность и не только по причине отсутствия в ее составе возраста дерева, а главным образом потому, что предполагает наличие влияния на зависимую переменную, равного со стороны каждого фактора, составляющего эту комбинированную переменную. То, что каждый фактор, или независимая переменная, в данном случае возраст, высота дерева и диаметр ствола, вносят свой, индивидуальный вклад в объяснение изменчивости морфологических показателей кроны, очевидно следует из характеристик моделей в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по материалам авторской базы данных для двухвойных сосен Евразии построены всеобщие модели для оценки морфологических показателей кроны – длины кроны, кронового отношения и высоты крепления кроны – по комплексу дендрометрических характеристик дерева. Выполнена проверка структуры моделей по условию мультиколлинеарности независимых переменных. Оказалось, что по условиям мультиколлинеарности, – с одной стороны, и статистической значимости независимых переменных, – с другой стороны, в модель того или иного морфологического показателя кроны можно включать лишь один из дендрометрических показателей: диаметр ствола, его высоту или возраст дерева. Но подобные однофакторные модели дают обычно неприемлемые смещения при использовании их на объектах, характеризующихся крайними значениями неучтенных дендрометрических показателей.

Выполненный регрессионный анализ показал, что полученные многофакторные модели для оценки морфологических показателей кроны по легко измеряемым дендрометрическим характеристикам дерева – диаметру ствола, его высоте и возрасту дерева – объясняют от 52 до 88 % изменчивости того или иного морфологического показателя кроны, а их регресси-

онные коэффициенты при независимых переменных значимы на уровне вероятности $p < 0,001$ и выше.

Попытка построения зависимости морфологических показателей кроны от комбинированной переменной, представляющей произведение диаметра и высоты ствола, деленное на густоту деревьев, показала, что полученная зависимость характеризуется существенно более низкой объяснительной способностью по сравнению с многофакторными моделями.

Предложенные многофакторные модели для оценки морфологических показателей кроны по известным дендрометрическим характеристикам дерева могут быть использованы в динамических моделях роста деревьев и древостоев, при разработке моделей биомассы деревьев и древостоев, а также при моделировании верховых лесных пожаров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Налимов В. В. Теория эксперимента. М. : Наука, 1971. 208 с.
2. Репина Е. Г., Цыпин А. П., Зайчикова Н. А. и др. Эконометрика в табличном редакторе MS Excel [Электронный ресурс] : практикум. Самара : Изд-во Самар. гос. экон. ун-та, 2019. ISBN 978-5-94622-970-8. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_010271621/.
3. Усольцев В. А. Фитомасса модельных деревьев для дистанционной и наземной таксации лесов Евразии : монография. Электронная база данных. 3-е изд., доп. Екатеринбург : Ботанический сад УрО РАН, Уральский государственный лесотехнический университет, 2023. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12451>.
4. Усольцев В. А., Колчин К. В., Норицина Ю. В. и др. Смещения всеобщих видоспецифичных аллометрических моделей при локальной оценке биомассы деревьев сосны, кедра и пихты // Эко-потенциал. 2017. № 2 (18). С. 47–58.
5. Усольцев В. А., Терехов Г. Г. Аллометрические модели биомассы и морфологии деревьев кедра сибирского на Урале и проблема мультиколлинеарности факторов // Хвойные бореальной зоны. 2025. Т. 43. № 2.
6. Baldwin V. C. Jr., Peterson K. D. Predicting the crown shape of loblolly pine trees // Canadian Journal of Forest Research. 1997. Vol. 27. P. 102–107.
7. Beekhuis J. Crown depth of radiata pine in relation to stand density and height // New Zealand Journal of Forestry. 1965. Vol. 10. P. 43–61.
8. Chen Q., Duan G., Liu Q. et al. Estimating crown width in degraded forest: a two-level nonlinear mixed-effects crown width model for *Dacrydium pierrei* and

- Podocarpus imbricatus* in tropical China // Forest Ecology and Management. 2021. Vol. 497. Article 119486.
9. Clutter J. L., Fortson J. C., Pienaar L. V. et al. Timber management: A quantitative approach. New York: John Wiley and sons, 1983. 333 p.
 10. Crecente-Campo F., Alvarez-Gonzalez J. G., Castedo-Dorado F. et al. Development of crown profile models for *Pinus pinaster* Ait. and *Pinus sylvestris* L. in northwestern Spain // Forestry. 2013. Vol. 86. P. 481–491.
 11. Curtis R. O., Reukema D. L. Crown development and site estimates in a Douglas-fir plantation spacing test // Forest Science. 1970. Vol. 16. P. 287–300.
 12. Dutcă I., McRoberts R. E., Naesset E. et al. A practical measure for determining if diameter (D) and height (H) should be combined into D^2H in allometric biomass models // Forestry: An International Journal of Forest Research. 2019. Vol. 92 (5). P. 627–634.
 13. Fish H., Loeffers V. J., Silins U. et al. Crown shyness in lodgepole pine stands of varying stand height, density, and site index in the upper foothills of Alberta // Canadian Journal of Forest Research. 2006. Vol. 36. P. 2104–2111.
 14. Fu L., Zhang H., Lu J. et al. Multilevel nonlinear mixed-effect crown ratio models for individual trees of Mongolian oak (*Quercus mongolica*) in Northeast China // PLoS ONE. 2015. Vol. 10 (8). Article e0133294.
 15. Gilmore D. W. Equations to describe crown allometry of *Larix* require local validation // Forest Ecology and Management. 2001. Vol. 148. P. 109–116.
 16. Hasenauer H., Monserud R. A. A crown ratio model for Austrian forests // Forest Ecology and Management. 1996. Vol. 84. P. 49–60.
 17. Hynynen J. Predicting tree crown ratio for unthinned and thinned Scots pine stands // Canadian Journal of Forest Research. 1995. Vol. 25. P. 57–62.
 18. Hytteborn H., Maslov A. A., Nazimova D. I. et al. Boreal forests of Eurasia. In: Ecosystems of the World. Vol. 6. Coniferous Forests. Andersson F. (ed.). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2005. P. 23–99.
 19. Kershaw J. A., Maguire D. A., Hann D. W. Longevity and duration of radial growth in Douglas-fir branches // Canadian Journal of Forest Research. 1990. Vol. 20. P. 1690–1695.
 20. Leites L. P., Robinson A. P., Crookston N. L. Accuracy and equivalence testing of crown ratio models and assessment of their impact on diameter growth and basal area increment predictions of two variants of the forest vegetation simulator // Canadian Journal of Forest Research. 2009. Vol. 39. P. 655–665.
 21. MacFarlane D. W., Green E. J., Burkhart H. E. Population density influences assessment and application of site index // Canadian Journal of Forest Research. 2000. Vol. 30. P. 1472–1475.
 22. Maltamo M., Bollandsås O. M., Vauhkonen J. et al. Comparing different methods for prediction of mean crown height in Norway spruce stands using airborne laser scanner data // Forestry. 2010. Vol. 83. P. 257–268.
 23. McAlpine R. S., Hobbs M. W. Predicting the height to live crown base in plantations of four boreal forest species // Wildland Fire. 1994. Vol. 4. P. 103–106.
 24. Meng S. X., Loeffers V. J., Huang S. M. Modeling crown volume of lodgepole pine based upon the uniform stress theory // Forest Ecology and Management. 2007. Vol. 251. P. 174–181.
 25. Moore J. R., Gardiner B. Relative wind firmness of New Zealand-grown *Pinus radiata* and Douglas-fir: A preliminary investigation // New Zealand Journal of Forestry Science. 2001. Vol. 31(2). P. 208–223.
 26. Rijal B., Weiskittel A. R., Kershaw J. A. Development of height to crown base models for thirteen tree species of the North American Acadian Region // The Forestry Chronicle. 2012. Vol. 88. P. 60–73.
 27. Ritchie M. W., Hann D. W. Equations for predicting height to crown base for fourteen tree species in southwest Oregon. Oregon State University, Forestry Research Laboratory, Corvallis, OR, 1987. 15 p.
 28. Ritson P., Sochacki S. Measurement and prediction of biomass and carbon content of *Pinus pinaster* trees in farm forestry plantations, south-western Australia // Forest Ecology and Management. 2003. Vol. 175. P. 103–117.
 29. Rouvinen S., Kuuluvainen T. Structure and asymmetry of tree crowns in relation to local competition in a natural mature Scots pine forest // Canadian Journal of Forest Research. 1997. Vol. 27. P. 890–902.
 30. Sattler D. F., LeMay V. A system of nonlinear simultaneous equations for crown length and crown radius for the forest dynamics model SORTIE-ND // Canadian Journal of Forest Research. 2011. Vol. 41(8). P. 1567–1576.
 31. Seidel D., Leuschner C., Muller A. et al. Crown plasticity in mixed forests – quantifying asymmetry as a measure of competition using terrestrial laser scanning // Forest Ecology and Management. 2011. Vol. 261. P. 2123–2132.
 32. Sharma R. P., Vacek Z., Vacek S. et al. Modelling individual tree height to crown base of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) // PLoS ONE. 2017. Vol. 12(10). Article e0186394.
 33. Sporek M., Sporek K. Allometric model of crown length for *Pinus sylvestris* L. stands in South-Western Poland // Forests. 2023. Vol. 14. Article 1779.
 34. Sporek M., Sporek K., Kucerk M. Verification of the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) crown length model // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. Article 3124.
 35. Sprugel D. G. Correcting for bias in log-transformed allometric equations // Ecology. 1983. Vol. 64. P. 208–210.
 36. Temesgen H., LeMay V., Mitchell S. J. Tree crown ratio models for multi-species and multi-layered stands of southeastern British Columbia // The Forestry Chronicle. 2005. Vol. 81(1). P. 133–141.
 37. Valentine H. T., Mäkelä A., Green E. J. et al. Models relating stem growth to crown length dynamics: application to loblolly pine and Norway spruce // Trees. 2012. Vol. 26. P. 469–478.
 38. Valentine H. T., Ludlow A. R., Furnival G. M. Modeling crown rise in even-aged stands of Sitka spruce or loblolly pine // Forest Ecology and Management. 1994. Vol. 69. P. 189–197.
 39. Yan Y., Wang J., Liu S. et al. Modeling the influence of competition, climate, soil, and their interaction on height to crown base for Korean pine plantations in

Northeast China // *European Journal of Forest Research*. 2024. Vol. 143. P. 1627–1640.

40. Zumrawi A. A., Hann D. W. Equations for predicting the height to crown base of six species in the Central Western Willamette Valley of Oregon. Oregon State University, Forest Research Laboratory, Corvallis, OR. Research Paper 52, 1989. 16 p.

41. Zybura H. Length of tree crowns in pine stands // *Sylvan*. 1977. Vol. 1. P. 13–20.

REFERENCES

1. Nalimov V. V. *Teoriya eksperimenta*. M. : Nauka, 1971. 208 s.

2. Repina E. G., Cypin A. P., Zajchikova N. A. i dr. *Ekonometrika v tablichnom redaktore MS Excel [Elektronnyj resurs] : praktikum*. Samara: Izd-vo Samar. gos. ekon. un-ta, 2019. ISBN 978-5-94622-970-8. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_010271621/.

3. Usol'cev V. A. Fitomassa model'nyh derev'ev dlya distancionnoj i nazemnoj taksacii lesov Evrazii : monografiya.. Elektronnyaya baza dannyh. 3-e izdanie, dopolnennoe. Ekaterinburg: Botanicheskij sad Uro RAN, Ural'skij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet, 2023. 1 elektron. opt. disk (CD-ROM). URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12451>.

4. Usol'cev V. A., Kolchin K. V., Noricina Yu. V. i dr. Smeshcheniya vseobshchih vidospecificnyh allometricheskikh modelej pri lokal'noj ocenke biomassy derev'ev sosny, kedra i pihty // *Eko-potencial*. 2017. № 2 (18). S. 47–58.

5. Usol'cev V. A., Terekhov G. G. Allometricheskie modeli biomassy i morfologii derev'ev kedra sibirskogo na Urale i problema mul'tikollinearnosti faktorov // *Hvoynye boreal'noj zony*. 2025. T. 43. № 2.

6. Baldwin V. C. Jr., Peterson K. D. Predicting the crown shape of loblolly pine trees // *Canadian Journal of Forest Research*. 1997. Vol. 27. P. 102–107.

7. Beekhuis J. Crown depth of radiata pine in relation to stand density and height // *New Zealand Journal of Forestry*. 1965. Vol. 10. P. 43–61.

8. Chen Q., Duan G., Liu Q. et al. Estimating crown width in degraded forest: a two-level nonlinear mixed-effects crown width model for *Dacrydium pierrei* and *Podocarpus imbricatus* in tropical China // *Forest Ecology and Management*. 2021. Vol. 497. Article 119486.

9. Clutter J. L., Fortson J. C., Pienaar L. V. et al. *Timber management: A quantitative approach*. New York: John Wiley and sons, 1983. 333 p.

10. Crecente-Campo F., Alvarez-Gonzalez J. G., Castedo-Dorado F. et al. Development of crown profile models for *Pinus pinaster* Ait. and *Pinus sylvestris* L. in northwestern Spain // *Forestry*. 2013. Vol. 86. P. 481–491.

11. Curtis R. O., Reukema D. L. Crown development and site estimates in a Douglas-fir plantation spacing test // *Forest Science*. 1970. Vol. 16. P. 287–300.

12. Dutcă I., McRoberts R. E., Naesset E. et al. A practical measure for determining if diameter (D) and height (H) should be combined into D2H in allometric biomass models // *Forestry: An International Journal of Forest Research*. 2019. Vol. 92 (5). P. 627–634.

13. Fish H., Lieffers V. J., Silins U. et al. Crown shyness in lodgepole pine stands of varying stand height,

density, and site index in the upper foothills of Alberta // *Canadian Journal of Forest Research*. 2006. Vol. 36. P. 2104–2111.

14. Fu L., Zhang H., Lu J. et al. Multilevel nonlinear mixed-effect crown ratio models for individual trees of Mongolian oak (*Quercus mongolica*) in Northeast China // *PLoS ONE*. 2015. Vol. 10 (8). Article e0133294.

15. Gilmore D. W. Equations to describe crown allometry of *Larix* require local validation // *Forest Ecology and Management*. 2001. Vol. 148. P. 109–116.

16. Hasenauer H., Monserud R. A. A crown ratio model for Austrian forests // *Forest Ecology and Management*. 1996. Vol. 84. P. 49–60.

17. Hynynen J. Predicting tree crown ratio for unthinned and thinned Scots pine stands // *Canadian Journal of Forest Research*. 1995. Vol. 25. P. 57–62.

18. Hytteborn H., Maslov A. A., Nazimova D. I. et al. Boreal forests of Eurasia. In: *Ecosystems of the World*. Vol. 6. Coniferous Forests. Andersson F. (ed.). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2005. P. 23–99.

19. Kershaw J. A., Maguire D. A., Hann D. W. Longevity and duration of radial growth in Douglas-fir branches // *Canadian Journal of Forest Research*. 1990. Vol. 20. P. 1690–1695.

20. Leites L. P., Robinson A. P., Crookston N. L. Accuracy and equivalence testing of crown ratio models and assessment of their impact on diameter growth and basal area increment predictions of two variants of the forest vegetation simulator // *Canadian Journal of Forest Research*. 2009. Vol. 39. P. 655–665.

21. MacFarlane D. W., Green E. J., Burkhart H. E. Population density influences assessment and application of site index // *Canadian Journal of Forest Research*. 2000. Vol. 30. P. 1472–1475.

22. Maltamo M., Bollandsås O. M., Vauhkonen J. et al. Comparing different methods for prediction of mean crown height in Norway spruce stands using airborne laser scanner data // *Forestry*. 2010. Vol. 83. P. 257–268.

23. McAlpine R. S., Hobbs M. W. Predicting the height to live crown base in plantations of four boreal forest species // *Wildland Fire*. 1994. Vol. 4. P. 103–106.

24. Meng S. X., Lieffers V. J., Huang S. M. Modeling crown volume of lodgepole pine based upon the uniform stress theory // *Forest Ecology and Management*. 2007. Vol. 251. P. 174–181.

25. Moore J. R., Gardiner B. Relative wind firmness of New Zealand-grown *Pinus radiata* and Douglas-fir: A preliminary investigation // *New Zealand Journal of Forestry Science*. 2001. Vol. 31(2). P. 208–23.

26. Rijal B., Weiskittel A. R., Kershaw J. A. Development of height to crown base models for thirteen tree species of the North American Acadian Region // *The Forestry Chronicle*. 2012. Vol. 88. P. 60–73.

27. Ritchie M. W., Hann D. W. Equations for predicting height to crown base for fourteen tree species in southwest Oregon. Oregon State University, Forestry Research Laboratory, Corvallis, OR, 1987. 15 p.

28. Ritson P., Sochacki S. Measurement and prediction of biomass and carbon content of *Pinus pinaster* trees in farm forestry plantations, south-western Australia // *Forest Ecology and Management*. 2003. Vol. 175. P. 103–117.

29. Rouvinen S., Kuuluvainen T. Structure and asymmetry of tree crowns in relation to local competition in a natural mature Scots pine forest // *Canadian Journal of Forest Research*. 1997. Vol. 27. P. 890–902.
30. Sattler D. F., LeMay V. A system of nonlinear simultaneous equations for crown length and crown radius for the forest dynamics model SORTIE-ND // *Canadian Journal of Forest Research*. 2011. Vol. 41(8). P. 1567–576.
31. Seidel D., Leuschner C., Muller A. et al. Crown plasticity in mixed forests—quantifying asymmetry as a measure of competition using terrestrial laser scanning // *Forest Ecology and Management*. 2011. Vol. 261. P. 2123–2132.
32. Sharma R. P., Vacek Z., Vacek S. et al. Modelling individual tree height to crown base of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) // *PLoS ONE*. 2017. Vol. 12(10). Article e0186394.
33. Sporek M., Sporek K. Allometric model of crown length for *Pinus sylvestris* L. stands in South-Western Poland // *Forests*. 2023. Vol. 14. Article 1779.
34. Sporek M., Sporek K., Kucerka M. Verification of the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) crown length model // *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. Article 3124.
35. Sprugel D. G. Correcting for bias in log-transformed allometric equations // *Ecology*. 1983. Vol. 64. P. 208–210.
36. Temesgen H., LeMay V., Mitchell S. J. Tree crown ratio models for multi-species and multi-layered stands of southeastern British Columbia // *The Forestry Chronicle*. 2005. Vol. 81(1). P. 133–141.
37. Valentine H. T., Mäkelä A., Green E. J. et al. Models relating stem growth to crown length dynamics: application to loblolly pine and Norway spruce // *Trees*. 2012. Vol. 26. P. 469–478.
38. Valentine H. T., Ludlow A. R., Furnival G. M. Modeling crown rise in even-aged stands of Sitka spruce or loblolly pine // *Forest Ecology and Management*. 1994. Vol. 69. P. 189–197.
39. Yan Y., Wang J., Liu S. et al. Modeling the influence of competition, climate, soil, and their interaction on height to crown base for Korean pine plantations in Northeast China // *European Journal of Forest Research*. 2024. Vol. 143. P. 1627–1640.
40. Zumrawi A. A., Hann D. W. Equations for predicting the height to crown base of six species in the Central Western Willamette Valley of Oregon. Oregon State University, Forest Research Laboratory, Corvallis, OR. Research Paper 52, 1989. 16 p.
41. Zybura H. Length of tree crowns in pine stands // *Sylvan*. 1977. Vol. 1. P. 13–20.

© Усольцев В. А., 2025

Поступила в редакцию 10.01.2025
Принята к печати 04.08.2025

ИЗМЕНЧИВОСТЬ 8-ЛЕТНИХ СЕЯНЦЕВ СОСНЫ КЕДРОВОЙ СИБИРСКОЙ, ВЫРАЩЕННЫХ ИЗ ОТСЕЛЕКТРОВАННЫХ ШИШЕК АЛТАЙСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Р. Н. Матвеева, О. Ф. Буторова, С. В. Попова, М. В. Гришлова, А. С. Коростелев, С. Н. Дырдин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: butorova.olga@mail.ru

Аннотация. Размеры шишек в разных популяциях хвойных видов отличаются по своим показателям в зависимости от места произрастания, наследственности и других факторов. Цель исследований – проанализировать изменчивость показателей 8-летних сеянцев сосны кедровой сибирской, выращенных из отселектированных шишек, собранных в Чойском лесничестве Республики Алтай. Семена были посеяны в интродукционном отделении дендрария Караульного лесничества Учебно-опытного лесхоза СибГУ (пригородная зона Красноярск). Изменчивость семенного потомства оценивали по высоте, приросту побега, диаметру стволика, длине хвои. Уровень варьирования показателей устанавливали по шкале С. А. Мамаева. Исследования показали, что шишки, собранные с разных деревьев, отличались формой, длиной, диаметром, количеством семян. Длина шишек варьировала от 7,5 до 11,5 см при среднем значении 9,1 см; диаметр – от 5,5 до 6,3 см при среднем значении 5,7 см. Шишки были цилиндрической и округлой форм. Количество семенных чешуй варьировало от 45 до 89 шт., количество семян – от 85 до 169 шт. Наибольшее количество семян отмечено в шишке № 29 цилиндрической формы. Установлена тесная корреляционная связь ($r = 0,995$) между количеством семян (y) и чешуй (x). Наибольшей высотой отличаются сеянцы из шишки № 9, имеющей превышение по длине. Уровень варьирования высоты сеянцев в сравниваемых семьях – от низкого до высокого, межсемейный уровень варьирования (11,3 %) меньше, чем внутрисемейный. Между длиной шишек и приростом сеянцев коэффициент корреляции равен 0,829. Средняя длина хвои варьировала от 8,0 до 9,8 см, то есть различие между крайними вариантами равно 22,5 %. Выделены экземпляры, отличающиеся интенсивным ростом, большим количеством почек и длинной хвоей.

Ключевые слова: сосна кедровая сибирская, шишки, сеянцы, изменчивость, отбор.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 4, P. 20–25

VARIABILITY OF 8-YEAR-OLD SIBERIAN PINE SEEDLINGS GROWN FROM SELECTED CONES OF ALTAI ORIGIN

R. N. Matveeva, O. F. Butorova, S. V. Popova, M. V. Grishlova, A. S. Korostelev, S. N. Dyrдин

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: butorova.olga@mail.ru

Annotation. The size of cones in different populations of coniferous species differs in their indicators depending on the place of growth, heredity and other factors. The aim of the research was to analyze the variability of 8-year-old Siberian pine seedlings grown from selected cones collected in the Choysky forestry of the Altai Republic. The seeds were sown in the introduction department of the arboretum of the Karaulny Forestry of the Educational and Experimental Forestry of Reshetnev University (suburban zone of Krasnoyarsk). The variability of seed progeny was assessed by height, shoot growth, trunk diameter, and needle length. The level of variation of indicators was established according to the scale of S. A. Mamaev. Studies have shown that cones collected from different trees differed in shape, length, diameter, and number of seeds. The length of the cones varied from 7.5 to 11.5 cm with an average value of 9.1 cm; diameter varied from 5.5 to 6.3 cm with an average value of 5.7 cm. The cones were cylindrical and rounded. The number of seed scales varied from 45 to 89 pcs., the number of seeds varied from 85 to 169 pcs. The largest number of seeds was noted in cone No 29 of cylindrical shape. A close correlation ($r = 0.995$) was established between the number of seeds (y) and scales (x). The highest height is distinguished by seedlings from cone No 9, which has an excess in length. The level of variation in the height of seedlings in the compared families is from low to high, the interfamilial level of variation (11.3 %) is less than the intrafamilial level. The correlation coefficient between the length of the cones and the growth of seedlings is 0.829. The average length of the needles varied from 8.0 to 9.8 cm, that is, the difference between the extreme options is 22.5 %. Specimens distinguished by intensive growth, a large number of buds and long needles have been identified.

Keywords: Siberian pine, cones, seedlings, variability, selection.

ВВЕДЕНИЕ

Показатели шишек в разных популяциях хвойных видов отличаются в зависимости от мест произрастания, особенно северных и южных популяций; наследственности, условий выращивания и др. [1; 3; 5; 10–15 и др.].

А. В. Поповым, С. Н. Велисевич [11] показан уровень и характер изменчивости качества шишек и семян у 32 деревьев сосны кедровой сибирской. Установлен максимальный уровень изменчивости доли недоразвитых, пустых и неполных семян. У признаков, зависящих от генотипа материнского растения, формирование и размеры шишек (число чешуй и семян), уровень варьирования был ниже.

Влияние почвы и происхождения семян на показатели сеянцев сосны кедровой сибирской рассмотрено в работах С. Н. Велисевич и др. [6], О. Г. Бендер и др. [2]. Ими изучены особенности всхожести семян и роста однолетних сеянцев сосны кедровой сибирской в условиях, соответствующих лесоболотному экологическому профилю, где были заготовлены семена, а также в различных по влажности и плодородию почвах. В результате исследований грунтовая всхожесть и рост сеянцев оказались выше в условиях, соответствующих «материнской» популяции, и на плодородной почве.

Определены корреляционные связи между высотой сеянцев, длиной и количеством семядолей, почек, длиной первичной хвои, которые являются элементами ранней диагностики на первых этапах онтогенеза. Так, у 3–4-летних сеянцев на быстроту роста указывают наибольшие показатели по диаметру и высоте, образованию не менее двух крупных верхушечных почек [8].

Установлено [4], что у однолетних сеянцев сосны кедровой сибирской, отличающихся большим количеством семядолей, наблюдаются в дальнейшем превышения по высоте, диаметру, фитомассе. Проявляются раннее репродуктивное развитие, повышенная урожайность. В качестве элементов ранней диагностики предлагается использовать длину семядолей, верхушечных почек, высоту сеянцев.

По данным А. М. Пастуховой [9], в опыте с трехлетними сеянцами сосны кедровой сибирской в зависимости от условий выращивания, сроков посева и географического происхождения материнских растений выявлена значительная доля влияния (52,9 %) географического происхождения на их высоту и 20,0 % – на срок посева от общей дисперсии изучаемых факторов.

М. А. Карасёвой и др. [7] при изучении показателей роста 13-летнего семенного потомства сосны кедровой сибирской в Марийском Заволжье установлено, что изменчивость высоты и приростов составляет 33–39 %, что позволяет выделить лидирующие генотипы, обладающие устойчивостью и высокими адаптивными свойствами. Лидирующие особи сохраняют интенсивность роста и в последующие годы.

Цель исследований – проанализировать изменчивость показателей 8-летних сеянцев сосны кедровой сибирской, выращенных из шишек, собранных в Чой-

ском лесничестве Республики Алтай, отличающихся по размерам, форме и др.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Шишки отличались по длине, диаметру, форме. Семена из каждой шишки были посеяны в интродукционном отделении дендрария, расположенном в Караульном лесничестве Учебно-опытного лесхоза СибГУ (пригородная зона Красноярск). Изменчивость семенного потомства оценивали по высоте, приросту побега, диаметру стволика, длине хвои. Уровень варьирования показателей устанавливали по шкале С. А. Мамаева [1973]. Данные были обработаны статистически с использованием программы Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Шишки, собранные с разных деревьев в Чойском лесничестве Республики Алтай, отличались формой, длиной, диаметром, количеством семян [Попова и др., 2021]. Длина шишек варьировала от 7,5 до 11,5 см при среднем значении 9,1 см; диаметр – от 5,5 до 6,3 см при среднем значении 5,7 см. К крупношишечным отнесены № 25, 9, 29 (длина 10,0–11,5 см, диаметр – 5,4–5,8 см), к мелкошишечным – № 23 (рис. 1).

Коэффициент корреляции между шириной и длиной шишки равен 0,334. По соотношению диаметра и длины шишек цилиндрическая форма была у 5 шишек, округлая – у 4 шишек. Количество семенных чешуй варьировало от 45 до 89 шт., семян – от 85 до 169 шт. Наибольшее количество семян отмечено в шишке № 29 цилиндрической формы. Часть чешуй была с одним семенем (4,1–24,5 %), большая часть чешуй (75,5–95,9 %) имела по 2 семени. Наибольшее количество фертильных чешуй было у шишки № 9. У шишки № 30 процент чешуй с 2 семенами составил всего 75,5 % (рис. 2).

Установлена тесная корреляционная прямая связь ($r = 0,995$) между количеством семян (y) и чешуй (x).

Уравнение связи имеет вид

$$y = 1,9698x - 5,775 \quad R^2 = 0,991.$$

Результаты исследований изменчивости показателей сеянцев 8-летнего возраста в зависимости от принадлежности к определенной шишке показали, что высота сеянцев в различных семьях варьирует от 20,9 до 29,8 см. Наибольшей высотой отличаются сеянцы из шишки № 9 (имеющей и наибольшую длину), которые существенно ($t_{\phi} > t_{05}$) превышают высоту сеянцев в вариантах № 21, 29, 30, 31 на 21,1–42,6 % (табл. 1).

Уровень варьирования высоты сеянцев в сравниваемых семьях – от низкого до высокого. Самый низкий уровень изменчивости высоты в семье № 29, самый высокий – в семье № 33. Межсемейный уровень варьирования (11,3 %) меньше, чем внутрисемейный.

Диаметр стволика составил 3,6–5,0 мм. Большим диаметром выделяются сеянцы в семье № 33, превышая только семью № 31 на 38,9 %, достоверность различий между семьями подтверждается t -критерием.

С остальными семьями различие недостоверно. Уровень изменчивости диаметра средний в семьях № 21 и 29 и высокий в остальных семьях. Самый высокий уровень варьирования у сеянцев из шишки № 33. Варьирование диаметра стволика между семьями составило 10,8 %, что значительно меньше, чем внутри семей.

По приросту побега семьи также имеют значительные различия. Наибольший прирост отмечен в семье № 9, что, соответственно, превышает прирост в семьях № 29, 31. Уровень изменчивости в семьях высокий и очень высокий, между семьями – высокий (22,5 %).

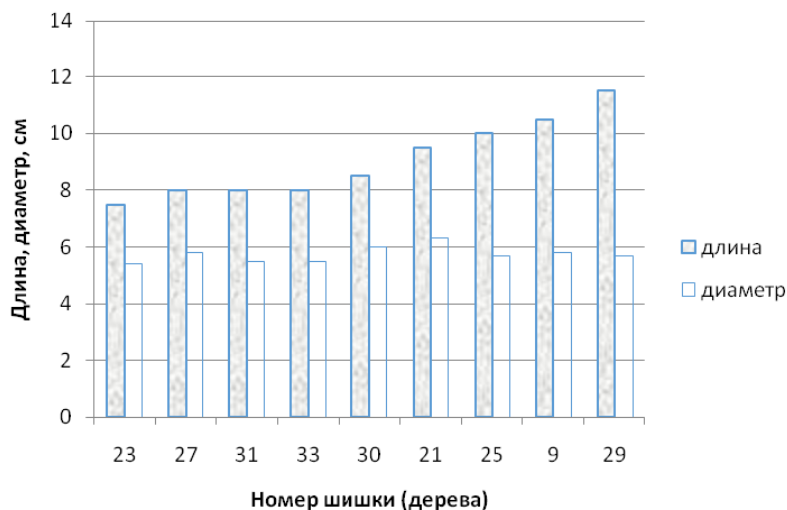


Рис. 1. Размеры шишек с разных деревьев

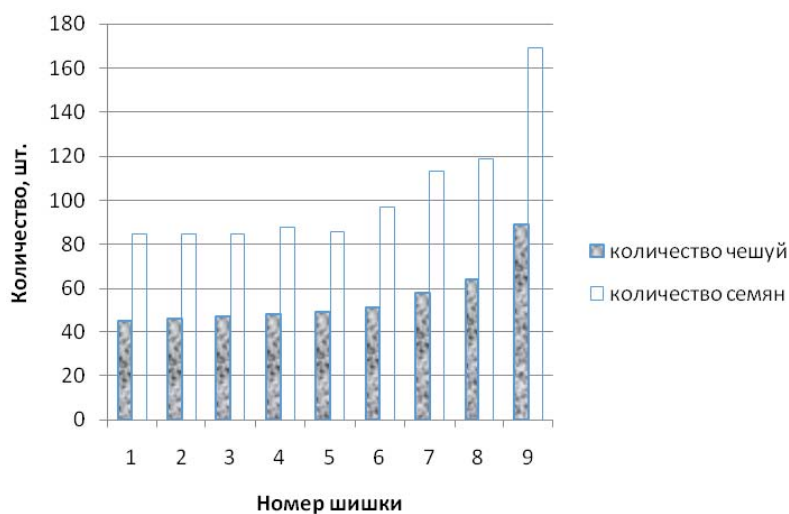


Рис. 2. Количество чешуй и семян в шишках

Таблица 1

Высота, диаметр стволика, прирост 8-летних сеянцев сосны кедровой сибирской

Номер шишки (семьи)	$\bar{X}_{\text{ср.}}$	$\pm m$	V, %	t_{ϕ} при $t_{05} = 1,99$	Уровень варьирования
Высота, см					
9	29,8	1,51	20,8	—	средний
21	21,9	1,86	20,8	3,31	средний
25	26,0	2,00	24,4	1,52	высокий
27	25,0	2,25	27,0	1,77	высокий
29	20,9	0,79	12,0	5,23	низкий
30	24,6	1,98	24,1	2,09	высокий
31	23,0	2,01	26,2	2,71	высокий
33	25,7	3,02	31,1	1,21	высокий
Среднее значение	24,6	0,98	11,3		

Окончание таблицы 1

Номер шишки (семьи)	$X_{\text{ср.}}$	$\pm m$	V, %	$t_{\text{ф}}$ при $t_{05} = 1,99$	Уровень варьирования
Диаметр стволика, мм					
9	4,4	0,25	23,4	0,96	высокий
21	4,0	0,23	13,8	1,63	средний
25	4,4	0,32	22,9	0,92	высокий
27	4,5	0,46	31,7	0,68	высокий
29	3,9	0,24	19,1	1,78	средний
30	4,8	0,40	26,6	0,29	высокий
31	3,6	0,33	28,7	2,13	высокий
33	5,0	0,57	36,3	–	высокий
Среднее значение	4,3	0,17	10,8		
Текущий прирост побега, см					
9	6,9	0,57	34,3	–	высокий
21	4,8	1,13	57,6	1,66	очень высокий
25	5,7	0,72	39,9	1,30	высокий
27	6,6	1,09	49,6	0,24	очень высокий
29	3,8	0,36	29,9	4,58	высокий
30	5,3	0,69	39,0	1,78	высокий
31	3,6	0,63	52,7	3,86	очень высокий
33	5,3	1,05	52,4	1,34	очень высокий
Среднее значение	5,2	0,42	22,5		

Между длиной шишек и приростом сеянцев коэффициент корреляции равен 0,829.

Показатель качества посадочного материала, характеризующий отношением диаметра стволика у корневой шейки к высоте, составило 0,15–0,20. Наи-

меньшее соотношение было у сеянцев в семье № 9, наибольшее – в семье № 30.

Среднее количество верхушечных почек на сеянцах в разных вариантах варьировало от 1,4 до 2,4 шт. (табл. 2).

Таблица 2

Количество, длина почек и хвои 8-летних сеянцев сосны кедровой сибирской

Номер шишки (семьи)	$X_{\text{ср.}}$	$\pm m$	V, %	$t_{\text{ф}}$ при $t_{05} = 1,99$	Уровень варьирования
Количество почек, шт.					
9	2,0	0,20	41,8	0,80	очень высокий
21	2,0	0,32	39,5	0,71	высокий
25	2,2	0,21	29,5	0,40	средний
27	2,4	0,46	57,5	–	очень высокий
29	2,3	0,31	42,3	0,18	высокий
30	1,9	0,33	54,4	0,89	очень высокий
31	1,4	0,11	24,6	2,12	средний
33	2,3	0,47	64,4	0,15	очень высокий
Среднее значение	2,1				
Длина почек, см					
9	0,7	0,05	31,8	1,57	высокий
21	0,6	0,13	52,7	1,74	очень высокий
25	0,7	0,03	13,9	1,68	средний
27	0,9	0,11	38,3	–	высокий
29	0,6	0,03	16,2	2,52	средний
30	0,8	0,09	34,5	0,69	высокий
31	0,5	0,08	48,3	2,90	очень высокий
33	0,7	0,08	37,0	1,42	высокий
Среднее значение	0,7				
Длина хвои, см					
9	8,6	0,28	13,6	2,35	средний
21	8,7	0,61	17,3	1,47	средний
25	9,6	0,27	8,8	0,40	низкий
27	9,3	0,52	16,7	0,75	средний
29	8,4	0,74	27,8	1,64	высокий
30	9,8	0,43	13,7	–	средний
31	8,2	0,29	11,4	3,09	низкий
33	8,0	0,63	25,0	2,36	высокий
Среднее значение	8,8				

По количеству почек различие между крайними значениями составило 71,4 % при наибольшем значении у сеянцев семьи № 27. Но достоверное различие подтверждается только с семьей № 31, с остальными семьями различие несущественное ($t_{\phi} < t_{05}$). Варьирование в семьях между сеянцами среднее, высокое и очень высокое ($V = 24,6-64,4$ %).

При средней длине почек 0,5-0,9 см отмечается средний, высокий и очень высокий уровни изменчивости в пределах семей. Наибольшая длина почек была в варианте № 27, но достоверное различие по данному показателю установлено только с растениями в семьях № 29 и 31. Длина почек в других вариантах не имеет существенных различий с семьей № 27.

Средняя длина хвои составила от 8,0 до 9,8 см, то есть различие между крайними вариантами равно 22,5 %. Длинная хвоя сформировалась у сеянцев, выросших из шишки № 30. Достоверно меньшая длина хвои была у сеянцев в вариантах № 9, 31, 33. Варьирование показателя находится на низком, среднем и высоком уровнях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований была установлена значительная изменчивость размеров шишек, заготовленных с разных деревьев сосны кедровой сибирской по длине, диаметру, количеству чешуй, семян. Сеянцы, выращенные из разных шишек, отличались биометрическими показателями. Установлено, что наибольшая высота была у сеянцев из шишки № 9, имевшей наибольшую длину. Наблюдается умеренная и тесная корреляционная связь между размерами шишек; количеством чешуй и семян. Отсекалированы сеянцы по интенсивности роста, длине хвои, количеству почек с целью их дальнейшего вегетативного размножения и использования для создания плантаций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Бабич Н. А., Хамитов Р. С. Рост сеянцев сосны кедровой сибирской в потомстве деревьев разных половых типов // Лесной журнал. 2018. № 1. С. 29–36. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.1.29.
2. Бендер О. Г., Велисевич С. Н., Читоркина О. Ю., Зотикова А. П., Чернова Н. А. Анализ влияния качества почвенного субстрата и происхождения семян на морфогенез сеянцев кедра сибирского // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 1. С. 109–121.
3. Бородинцева Л. И., Тараканов В. В., Гончарова Т. В. Продуктивность и качество семян кедра сибирского на лесосеменных объектах в Республике Алтай // Сибирский лесной журнал. 2023. № 4. С. 52–57. DOI 10.15372/SJFS20230405.
4. Братилова, Н. П., Орешенко С. А. Отбор ценных биотипов сосны кедровой сибирской по показателям их семенного потомства // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений. Красноярск : СибГУ, 2009. С. 10–13.
5. Брынцев, В. А., Храмова М. И. Изменчивость семенного потомства сосны кедровой сибирской при интродукции // Лесной журнал. 2013. № 6. С. 38–49.

6. Велисевич С. Н., Бендер О. Г., Читоркина О. Ю. Влияние происхождения семян и качества почвенного субстрата на развитие сеянцев сосны кедровой сибирской // Хвойные бореальной зоны. 2011. Т. XXIX, № 3–4. С. 194–200.

7. Карасёва М. А., Мухортов Д. И., Лежнин К. Т. Изменчивость показателей роста семенного потомства сосны кедровой сибирской местной репродукции в Марийском Заволжье // Вестник ПГТУ. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2023. № 1 (57). С. 73–87. doi.org/10.25686/2306-2827.2023.1.73.

8. Матвеева Р. Н., Буторова О. Ф. Генетика, селекция, семеноводство кедра сибирского. Красноярск : СибГТУ, 2000. 243 с.

9. Пастухова А. М. Изменчивость трехлетнего семенного потомства кедра сибирского от материнских растений разного географического происхождения // Вестник КрасГАУ. 2011. № 4. С. 95–98.

10. Пинаева Н. В., Данченко А. М. Биологические особенности роста сеянцев сосны кедровой сибирской // Актуальные проблемы лесоведения. Вестник ТГУ. Томск, 2006. Вып. 87. С. 56–67.

11. Попов А. В., Велисевич С. Н. Внутрипопуляционная изменчивость качества шишек и семян кедра сибирского на плантации с разреженной посадкой // Лесной вестник. 2021. Т. 25, № 3. С. 34–41. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-3-34-41.

12. Попова С. В. Изменчивость сеянцев сосны кедровой сибирской назаровского и мининского происхождения при разных условиях стратификации семян // Леса России и хозяйство в них. 2023. № 3 (86). С. 116–124. DOI: 10.51318/FRET.2023.86.31.001.

13. Хамитов Р. С., Хамитова С. М. Влияние технологии выращивания сеянцев кедра сибирского в Вологодском селекцентре на их качество // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений. Красноярск: СибГУ, 2024. С. 127–130.

14. Хамитов Р. С., Хамитова С. М. Влияние наследственных свойств на всхожесть семян кедра сибирского // Вестник БГАУ. 2015. № 4. С. 105–109.

15. Novikov A., Iveta V., Novikova T., Petrishchev E. Scots Pine Seedlings Growth Dynamics Data Reveals Properties for the Future Proof of Seed Coat Color Grading Conjecture // Forests. 2019. № 10. 1064; doi:10.3390/f10121064.

REFERENCES

1. Babich N. A., Hamitov R. S. Rost seyancev sosny kedrovoy sibirskoy v potomstve derev'ev raznykh polovykh tipov // Lesnoj zhurnal. 2018. № 1. S. 29–36. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.1.29.
2. Bender O. G., Velisevich S. N., Chitorkina O. Yu., Zotikova A. P., Chernova N. A. Analiz vliyaniya kachestva pochvennogo substrata i proiskhozhdeniya semyan na morfogenez seyancev kedra sibirskogo // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. 2012. № 1. S. 109–121.
3. Borodinceva L. I., Tarakanov V. V., Goncharova T. V. Produktivnost' i kachestvo semyan kedra sibirskogo na lesosemyennyykh ob'ektah v Respublike Altaj // Sibirskij lesnoj zhurnal. 2023. № 4. S. 52–57. DOI 10.15372/SJFS20230405.

4. Bratilova, N. P., Oreshenko S. A. Otbor cennyh biotipov sosny kedrovoj sibirskoj po pokazatelyam ih semennogo potomstva // Plodovodstvo, semenovodstvo, introdukciya drevesnyh rastenij. Krasnoyarsk : SibGU, 2009. S. 10–13.
5. Bryncev, V. A., Hramova M. I. Izmenchivost' semennogo potomstva sosny kedrovoj sibirskoj pri introdukcii // Lesnoj zhurnal. 2013. № 6. S. 38–49.
6. Velisevich S. N., Bender O. G., Chitorkina O. Yu. Vliyanie proiskhozhdeniya semyan i kachestva pochvennogo substrata na razvitie seyancev sosny kedrovoj sibirskoj // Hvojnye boreal'noj zony. 2011. T. XXIX, № 3-4. S. 194–200.
7. Karasyova M. A., Muhortov D. I., Lezhnin K. T. Izmenchivost' pokazatelej rosta semennogo potomstva sosny kedrovoj sibirskoj mestnoj reprodukcii v Marijskom Zavolzh'e // Vestnik PGU. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie. 2023. № 1 (57). S. 73–87. doi.org/10.25686/2306-2827.2023.1.73.
8. Matveeva R. N., Butorova O. F. Genetika, selekciya, semenovodstvo kedra sibirskogo. Krasnoyarsk : SibGTU, 2000. 243 s.
9. Pastuhova A. M. Izmenchivost' trekhletnego semennogo potomstva kedra sibirskogo ot materinskih rastenij raznogo geograficheskogo proiskhozhdeniya // Vestnik KrasGAU. 2011. № 4. S. 95–98.
10. Pinaeva N. V., Danchenko A. M. Biologicheskie osobennosti rosta seyancev sosny kedrovoj sibirskoj // Aktual'nye problemy lesovedeniya. Vestnik TGU. Tomsk, 2006. Vyp.87. S. 56–67.
11. Popov A. V., Velisevich S. N. Vnutripopulyacionnaya izmenchivost' kachestva shishek i semyan kedra sibirskogo na plantacii s razrezhennoj posadkoj // Lesnoj vestnik. 2021. T. 25, № 3. S. 34–41. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-3-34-41.
12. Popova S. V. Izmenchivost' seyancev sosny kedrovoj sibirskoj nazarovskogo i mininskogo proiskhozhdeniya pri raznyh usloviyah stratifikacii semyan // Lesa Rossii i hozyajstvo v nih. 2023. № 3 (86). S. 116–124. DOI: 10.51318/FRET.2023.86.31.001.
13. Hamitov R. S., Hamitova S. M. Vliyanie tekhnologii vyrashchivaniya seyancev kedra sibirskogo v Vologodskom selekcentre na ih kachestvo // Plodovodstvo, semenovodstvo, introdukciya drevesnyh rastenij. Krasnoyarsk: SibGU, 2024. S. 127–130.
14. Hamitov R. S., Hamitova S. M. Vliyanie nasledstvennyh svojstv na vskhozhest' semyan kedra sibirskogo // Vestnik BGAU. 2015. № 4. S. 105–109.
15. Novikov A., Ivetti V., Novikova T., Petrishchev E. Scots Pine Seedlings Growth Dynamics Data Reveals Properties for the Future Proof of Seed Coat Color Grading Conjecture // Forests. 2019. № 10. 1064; doi:10.3390/f10121064.

© Матвеева Р. Н., Буторова О. Ф.,
Попова С. В., Гришлова М. В.,
Коростелев А. С., Дырдин С. Н., 2025

Поступила в редакцию 17.02.2025
Принята к печати 04.08.2025

**РЕПРОДУКТИВНОЕ РАЗВИТИЕ 41-ЛЕТНИХ ПОЛУСИБОВ СОСНЫ КЕДРОВОЙ СИБИРСКОЙ
(*PINUS SIBIRICA DU TOUR*) ОТ ПЛЮСОВЫХ ДЕРЕВЬЕВ, АТТЕСТОВАННЫХ ПО СЕМЕННОЙ
ПРОДУКТИВНОСТИ**

А. С. Коростелев, Ю. Е. Щерба

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: shcherba_@mail.ru

Аннотация. Полусибовы сосны кедровой сибирской произрастают на плантации «Ермаки» в Саянском участковом лесничестве Ермаковского лесничества Красноярского края. Они являются семенным потомством плюсовых деревьев, аттестованных по семенной продуктивности в 1977 году в Колыванском лесхозе Новосибирской области: 89/53, 90/54, 99/63, 103/67, 109/73 и 110/74. Сопоставлено проявление изменчивости показателей полусибов между семьями и внутри семей. Отсеlectedированы полусибовы по наибольшему образованию макростробилов и озими: в семье 89/53 выделены полусибовы № 10-18 и № 10-11 (превышение над средним значением составило 120,3 и 78,0 %), в семье 90/54 – № 10-35 (129,2 %), 99/63 – № 10-19 (75,1 %), 103/67 – № 10-32 и № 10-27 (60,0 и 50,0 %), 109/73 – № 10-28 (115,7 %), 110/74 – № 10-16, № 10-23 и № 10-9 (114,2, 111,2 и 80,1 %). С наибольшим количеством микростробилов отсеlectedированы полусибовы: № 2-6 в семье 89/53 (превышение микростробилов составило 126,9 %), № 2-7 в семье 90/54 (54,0 %), № 2-23 в семье 99/63 (137,3 %), № 2-30 в семье 103/67 (264,3 %), № 2-24 в семье 109/73 (132,8 %), № 10-23 в семье 110/74 (71,8 %). Данные полусибовы рекомендуются для их размножения для выращивания посадочного материала с повышенной семенной продуктивностью.

Ключевые слова: сосна кедровая сибирская, плюсовые деревья, полусибовы, репродуктивное развитие, изменчивость, отбор.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 4, P. 26–31

**REPRODUCTIVE DEVELOPMENT OF 41-YEAR-OLD HALF-STANDS OF SIBERIAN CEDAR PINE
(*PINUS SIBIRICA DU TOUR*) FROM PLUS TREES SELECTED BY SEED PRODUCTIVITY**

A. S. Korostelev, Yu. E. Shcherba

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: shcherba_@mail.ru

Annotation. The half-siblings of Siberian cedar pine (*Pinus sibirica Du Tour*) are grow on the "Ermaki" plantation in the Sayansky district forestry of the Ermakovskoye forestry in Krasnoyarsk region. These are the seed progeny of plus trees certified for seed productivity in 1977 in the Kolyvan forestry district of Novosibirsk region: 89/53, 90/54, 99/63, 103/67, 109/73, and 110/74. The variability of indicators of half-siblings was compared between and within families. The half-siblings were selected for the highest formation of macrostrobili and cones: in family 89/53, half-siblings No. 10-18 and No. 10-11 (the excess over the average was 120.3 % and 78.0 %), in family 90/54 – No. 10-35 (129.2 %), 99/63 – No. 10-19 (75.1 %), 106/63 – No. 10-32 and No. 10-27 (60.0 % and 50.0 %), 109/73 – No. 10-28 (115.7 %), 110/74 – No. 10-16, No. 10-23 and No. 10-9 (114.2 %, 111.2 % and 80.1 %). The half-siblings with the highest number of microstrobiles were selected: No. 2-6 in family 89/53 (the excess was 126.9%), No. 2-7 in family 90/54 (54.0 %), No. 2-23 in family 99/63 (137.3%), No. 2-30 in family 103/67 (264.3 %), No. 2-24 in family 109/73 (132.8 %), No. 10-23 in family 110/74 (71.8 %). These half-siblings are recommended for propagation to grow planting material with increased seed productivity.

Keywords: Siberian cedar pine (*Pinus sibirica Du Tour*), plus trees, half-sibling, reproductive development, variability, selection.

ВВЕДЕНИЕ

Важной проблемой современного лесокультурного производства является решение вопросов генетики, селекции и семеноводства основных лесобразующих

видов, включая сосну кедровую сибирскую [15]. Сосна кедровая сибирская является древесной породой, образующей кедровые орехи, отличающиеся высокой питательной ценностью [1; 2; 3; 9; 12; 16; 18; 19]. В их

состав входят белки, жиры, углеводы, микроэлементы, нуклеиновые кислоты, витамины и другие биологически активные вещества [8; 13]. Проявление индивидуальной изменчивости данного вида и целесообразность проведения отбора отдельных экземпляров по семенной, стволовой, экологической продуктивности для выращивания посадочного материала и проведения посадок целевого назначения отмечается в публикациях многих авторов [4–7; 10; 11; 14; 20]. Так, Е. В. Титов пишет, что необходимо использовать высокопродуктивный отселектированный материал [17].

Целью наших исследований явилось отселектировать в семьях плюсовых деревьев сосны кедровой сибирской полусибыв, отличающиеся в 41-летнем возрасте повышенным образованием озими, макростробилов и микростробилов, произрастающих на плантации в Ермаковском лесничестве Красноярского края.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследований были полусибыв плюсовых деревьев сосны кедровой сибирской, произрастающие на первой секции плантации «Ермаки». Схема посадки 8×8 м. Полусибыв являются потомством плюсовых деревьев, произрастающих в Колыванском лесхозе Новосибирской области. При аттестации (1977 г.) они имели возраст от 110 до 140 лет, среднее многолетнее количество шишек на деревьях 259–470 шт., среднюю длину шишек на дереве от 6,2 до 8,3 см [11]. Весной 2024 года были сопоставлены показатели 41-летних полусибыв, вступивших в репродуктивную стадию развития от следующих плюсовых деревьев: 89/53, 90/54, 99/63, 103/67, 109/73 и 110/74. Установ-

лено проявление изменчивости полусибыв по образованию макро-, микростробилов и формированию озими.

Отселектированы экземпляры раннего репродуктивного развития по семенной (количество макростробилов и озими) и пыльцевой (количество микростробилов) продуктивности. Количественные показатели определяли методом пересчета, используя бинокль. Уровень изменчивости устанавливали по шкале С. А. Мамаева [11]. Обработку данных проводили с использованием программы Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Плюсовые деревья, использованные для сбора шишек, были аттестованы по семенной продуктивности в 1977 г. и имели следующие показатели (табл. 1).

Среди материнских плюсовых деревьев наибольшим количеством шишек и удельной энергией семенности отличались деревья 90/54 и 109/73.

В потомстве плюсовых деревьев по наибольшему количеству макростробилов и озими выделяются полусибыв плюсовых деревьев 90/54, 103/67 и 89/53 (табл. 2).

Среднее количество озими на дереве в семьях варьировало от 3,9 до 7,0 шт., достигая наибольшего показателя в семье полусибыв плюсового дерева 103/67. Превышение составило 37,2 % в сравнении со средним значением по опыту.

Пыльцевая продуктивность в семьях с учетом количества микростробилов на дереве варьирует от 1051,6 шт. до 1422,2 шт. Наибольшее значение отмечено в семьях плюсовых деревьев 99/63 и 89/53 (табл. 3).

Таблица 1
Показатели урожайности плюсовых деревьев

Номер семьи плюсового дерева	Среднемноголетнее количество шишек на дереве		Удельная энергия семенности		Длина шишек	
	шт.	% к Хср.	шт./см	% к Хср.	см	% к Хср.
89/53	328	91,2	6,3	95,4	6,5	95,6
90/54	470	130,6	10,2	154	6,5	95,6
99/63	259	70,3	4,7	71,2	6,4	94,1
103/67	302	83,9	6,0	90,9	8,3	122,0
109/73	441	122,6	6,9	104,5	7,2	105,9
110/74	359	99,8	5,3	80,3	6,2	91,2
Среднее значение по опыту	359,8	100,0	6,6	100,0	6,8	100,0

Таблица 2
Образование макростробилов и озими у полусибыв в семьях плюсовых деревьев

Номер семьи плюсового дерева	Макростробилов			Озими			Итого, шт.	
	мах, шт.	Хср., шт.	% к Хср. по опыту	мах, шт.	Хср., шт.	% к Хср. по опыту	Хср. по варианту	% к Хср. по опыту
89/53	35	18,0	108,4	23	5,6	109,8	23,6	108,8
90/54	37	18,2	109,6	18	5,8	113,7	24,0	110,6
99/63	30	18,0	108,4	18	4,2	82,3	22,2	102,3
103/67	27	16,9	101,8	13	7,0	137,2	23,9	110,1
109/73	30	16,4	98,8	21	4,0	78,4	20,4	94,0
110/74	29	12,2	73,5	16	3,9	76,5	16,1	74,2
Среднее значение по опыту	–	16,6	100,0	–	5,1	100,0	21,7	100,0

Превышение микростробилов на дереве у 41-летнего семенного потомства в семье плюсового дерева 99/63 было на 16,8 % и в семье 89/53 на 12,9 % в сравнении со средним значением по опыту. Количество ветвей с микростробилами превосходило у полусибов в семьях 103/67 и 99/63.

Наибольшее количество микростробилов на ветви и на дереве было у полусибов в семьях 99/63 и 89/53.

Уровень изменчивости количества макростробилов, озимей и микростробилов на 41-летних деревьях, образовавших репродуктивные органы, очень высокий (табл. 4).

В каждой семье были отселектированы полусибы, сформировавшие наибольшее количество макростробилов и озимей (табл. 5).

Таблица 3
Образование микростробилов у полусибов в семьях плюсовых деревьев

Номер семьи плюсового дерева	Ветвей с микростробилами		Микростробилов			
	шт.	% к Хср.	на ветви		на дереве	
			шт.	% к Хср.	шт.	% к Хср.
89/53	44,5	90,6	30,9	124,6	1375	112,9
90/54	44,7	91,0	23,7	95,6	1059,4	87,0
99/63	54,7	111,4	26,0	104,8	1422,2	116,8
103/67	54,8	111,6	21,1	85,1	1156,3	95,0
109/73	47,8	97,4	22,0	88,7	1051,6	86,4
110/74	48,1	98,0	24,8	100	1192,9	98,0
Среднее значение по опыту	49,1	100	24,8	100	1217,7	100

Таблица 4
Изменчивость полусибов по репродуктивному развитию

Показатель	Количество, шт.						
	max	min	Хср.	±m	±Ö	V, %	P, %
Макростробилы и озимей на дереве, шт.	52	2	21,1	1,93	13,24	52,8	9,2
Микростробилы на ветви, шт.	65	8	25,5	1,79	12,15	47,7	7,0

Таблица 5
Отселектированные полусибы по семеношению

Номер		Макростробилов		Озимей		Итого	
семьи	полусиба	шт.	% к Хср.	шт.	% к Хср.	шт.	% к Хср.
89/53	2-6	24	133,3	0	0,0	24	101,7
	10-11	35	194,4	7	125,0	42	178,0
	10-18	29	161,1	23	410,7	52	220,3
	10-34	24	133,3	3	53,5	27	144,4
Среднее значение		18	100,0	5,6	100,0	23,6	100,0
90/54	2-21	20	109,9	8	137,9	28	116,7
	10-12	26	142,8	0	0,0	26	116,7
	10-21	20	109,9	8	137,9	28	116,7
	10-35	37	203,3	18	310,3	55	229,2
Среднее значение		18,2	100,0	5,8	100,0	24,0	100,0
99/63	10-26	30	166,7	0	0,0	30	135,1
	10-6	25	138,9	1	23,8	26	117,1
	10-13	30	166,7	0	0,0	30	135,1
	10-19	21	116,7	18	428,6	39	175,7
	10-31	28	155,6	0	0,0	28	126,1
Среднее значение		18,0	100,0	4,2	100,0	22,2	100,0
103/67	10-14	24	142,0	3	42,8	27	113,0
	10-20	27	159,8	0	0	27	113,0
	10-27	26	153,8	10	142,8	36	150,6
	10-32	25	147,9	13	185,7	38	160,0
Среднее значение		16,9	100,0	7	100,0	23,9	100,0
109/73	10-8	30	182,9	0	0,0	30	147,0
	10-15	28	170,1	1	25,0	29	142,2
	10-22	22	134,1	6	150,0	28	130,3
	10-28	23	140,2	21	525,0	44	215,7

Окончание таблицы 5

Номер		Макростробилов		Озимы		Итого	
семьи	полусиба	шт.	% к Хср.	шт.	% к Хср.	шт.	% к Хср.
Среднее значение		16,4	100,0	4	100,0	20,4	100,0
110/74	10-9	23	188,5	0	0,0	23	180,1
	10-16	18	147,5	2	51,3	20	214,2
	10-23	18	147,5	16	410,2	34	211,2
	10-29	21	172,1	8	205,1	29	180,1
Среднее значение		12,2	100,0	3,9	100,0	16,1	100,0

Были отселектированы экземпляры раннего образования макростробилов (в 41-летнем возрасте). Так, в семье плюсового дерева 89/53 полусиб 10-18 образовал 23 шт. макростробилов в 40 лет и 29 шт. на следующий год (в 41-летнем возрасте).

Полусиб 10-18, отселектированный по образованию макростробилов и озими, приведен на рис. 1.

Отселектированные полусибы по образованию микростробилов приведены в табл. 6.

Среди отселектированных деревьев с наибольшим значением по количеству микростробилов занимают полусибы № 2-30 в семье плюсового дерева 103/67, № 2-6 – 89/53 и № 2-29 – 99/63 (рис. 2).



Рис. 1. Полусиб 10-18 семьи 89/53

Таблица 6
Полусибы, образовавшие наибольшее количество микростробилов

Номер		Микростробилы	
семьи	полусиба	шт.	% к Хср.
89/53	2-6	3120	226,9
	2-13	1705	124,0
Средние значение по варианту		1375	100,0
90/54	2-7	2652	250,3
	10-21	1220	115,2
	10-35	1632	154,0
Средние значение по варианту		1059,4	100,0
99/63	2-29	3375	237,3
	10-6	1920	135,0
	10-13	2340	164,6
	10-10	1740	122,3
Средние значение по варианту		1422,2	100,0
103/67	2-30	4212	364,3

Окончание таблицы 6

Номер		Микростробилы	
семьи	полусиба	шт.	% к Хср.
Средние значения по варианту		1156,3	100,0
109/73	2-17	2013	191,3
	2-24	2448	232,8
	10-22	1159	110,2
	10-28	1275	121,2
Средние значения по варианту		1051	100,0
110/74	2-18	1920	160,9
	10-9	1704	142,8
	10-16	1584	132,8
	10-23	2050	171,8
Средние значения по варианту		1192	100,0



Полусиб 2-30 семьи 103/67



Полусиб 2-6 семьи 89/53



Полусиб 2-29 семьи 99/63

Рис. 2. Отселектированные полусибовы по наибольшему количеству микростробилов

Отселектированные деревья рекомендуются для дальнейшего вегетативного размножения и использования их потомства при создании плантаций раннего репродуктивного развития.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Бабич Н. А., Соколов Н. Н., Бахтин А. А. Бесценный дар тайги. Архангельск : АГТУ, 1996. 224 с.
2. Пастухова А. М. Перспективность отбора полусибов кедра сибирского по интенсивности роста в раннем возрасте // Лесной журнал. 2017. № 5. С. 73–81.
3. Бех И. А., Данченко А. М., Кибиш И. В. Сосна кедровая сибирская (сибирское чудо-дерево). Томск : ТГУ, 2004. 160 с.
4. Братилова Н. П., Пастухова А. М. Изменчивость 21–25-летнего возраста сосны кедровой сибирской в плантационных культурах по семеношению // Лесное хозяйство и зеленое строительство в Западной Сибири. Томск : ТГУ, 2007, С. 32–35.
5. Изменчивость кедровых сосен разного географического происхождения на опытных участках в пригородной зоне Красноярска / Н. П. Братилова, Р. Н. Матвеева, М. В. Гришлова, О. Ф. Буторова. Красноярск : СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2024. 188 с.
6. Горошкевич С. Н. Селекция кедра сибирского как орехоплодной породы // Лесное хозяйство. 2000. № 4. С. 25–27.
7. Горошкевич, С. Н. Динамика роста и плодоношения кедра сибирского. Уровень и характер изменчивости признаков // Экология. 2008. № 3. С. 181–188.
8. Каретников П. В., Дмитриченко М. М. О содержании некоторых микроэлементов в кедровых орехах // Вопросы питания. 1966. Т. 25, № 5. С. 79–80.
9. Комарницкий В. В., Щерба Ю. Е. Изменчивость показателей сосны кедровой сибирской разного географического происхождения во втором поколении // Хвойные бореальные зоны. 2021. Т. 39, № 6. С. 451–456.
10. Крылов Г. В., Таланцев Н. К., Казакова Н. Ф. Кедр. Москва : Лесная промышленность, 1983. 216 с.
11. Мамаев С. А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере семейства *Pinaceae* на Урале. М. : Наука, 1972. 348 с.
12. Матвеева Р. Н., Буторова О. Ф., Братилова Н. П. Полезные свойства и методы размножения кедра сибирского. Красноярск : СибГТУ, 2003. 154 с.
13. Матвеева Р. Н., Братилова Н. П., Кубрина С. М. Изменчивость сосны кедровой сибирской по аккумуляции микроэлементов в хвое и семенах. Красноярск : СибГТУ, 2009. 96 с.

14. Матвеева Р. Н., Буторова О. Ф., Нарзяев В. В. Особенности роста, семеношения 30–35-летних рамет и полусибов плюсовых деревьев сосны кедровой сибирской (юг Средней Сибири). Красноярск : СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2021. 208 с.

15. Матвеева Р. Н., Буторова О. Ф., Комарницкий В. В. Изменчивость показателей сосны кедровой сибирской во втором поколении на плантации «ЛЭП-2». Красноярск : СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2024. 208 с.

16. Титов Е. В. Кедр. Царь сибирской тайги. Санкт-Петербург : Дилия, 2020. 288 с.

17. Титов Е. В. Орехопродуктивные кедровые плантации и лесосады. Воронеж : ВГТУ, 2021. 264 с.

18. Титов Е. В. Возрастная хронологическая изменчивость показателей плодоношения клонов кедра сибирского // Хвойные бореальной зоны. 2021. Т. 39, № 1. С. 39–44.

19. Щерба Ю. Е., Копченко Д. Е., Поплюйкова М. В. Изменчивость 36-летних полусибов плюсовых деревьев кедров сибирского по репродуктивному развитию на плантации «Ермаки» // Плодоводство, семеноводство и интродукция древесных растений. Красноярск : СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2020. Т. 23. С. 157–160.

20. Zhuk E., Goroshkevich S. Groth and reproduction in *Pinus sibirica* ecotypes from Western Sibirica in a common garden experiment // New Forests. 2018. Vol. 49, № 2. P. 159–172.

REFERENCES

1. Babich N. A., Sokolov N. N., Bahtin A. A. Bescenij dar tajgi. Arhangel'sk : AGTU, 1996. 224 s.

2. Pastuhova A. M. Perspektivnost' otbora polusibov kedra sibirskogo po intensivnosti rosta v rannem vozraste // Lesnoj zhurnal. 2017. № 5. S. 73–81.

3. Bekh I. A., Danchenko A. M., Kibish I. V. Sosna kedrovaya sibirskaya (sibirskoe chudo derevo). Tomsk : TGU, 2004. 160 s.

4. Bratilova N. P., Pastuhova A. M. Izmenchivost' 21–25-letnego vozrasta sosny kedrovoj sibirskoj v plantacionnyh kul'turah po semenosheniyu // Lesnoe hozyajstvo i zelenoe stroitel'stvo v Zapadnoj Sibiri. Tomsk : TGU, 2007. S. 32–35.

5. Izmenchivost' kedrovyyh sosen raznogo geograficheskogo proiskhozhdeniya na opytnyyh uchastkah v prigorodnej zone Krasnoyarska / N. P. Bratilova, R. N. Matveeva, M. V. Grishlova, O. F. Butorova. Krasnoyarsk : SibGU im. M. F. Reshetneva, 2024. 188 s.

6. Goroshkevich S. N. Selekcija kedra sibirskogo kak orekhoplodnoj porody // Lesnoe hozyajstvo. 2000. № 4. S. 25–27.

7. Goroshkevich S. N. Dinamika rosta i plodonosheniya kedra sibirskogo. Uroven' i harakter izmenchivosti priznakov // Ekologiya. 2008. № 3. S. 181–188.

8. Karetnikov P. V., Dmitrichenko M. M. O sodержanii nekotoryh mikroelementov v kedrovyyh orekhah // Voprosy pitaniya. 1966. T. 25, № 5. S. 79–80.

9. Komarnickij V. V., Shcherba Yu. E. Izmenchivost' pokazatelej sosny kedrovoj sibirskoj raznogo geograficheskogo proiskhozhdeniya vo vtorom pokolenii // Hvojnye boreal'nye zony. 2021. T. 39, № 6. S. 451–456.

10. Krylov G. V., Talancev N. K., Kazakova N. F. Kedr. Moskva : Lesnaya promyshlennost', 1983. 216 s.

11. Mamaev S. A. Formy vnutrividovoj izmenchivosti drevesnyh rastenij (na primere semeystva Pinaceae na Urale. M. : Nauka, 1972. 348 s.

12. Matveeva R. N., Butorova O. F., Bratilova N. P. Poleznye svojstva i metody razmnozheniya kedra sibirskogo. Krasnoyarsk : SibGTU, 2003. 154 s.

13. Matveeva R. N., Bratilova N. P., Kubrina S. M. Izmenchivost' sosny kedrovoj sibirskoj po akumuljatsii mikroelementov v hvoe i semenah. Krasnoyarsk : SibGTU, 2009. 96 s.

14. Matveeva R. N., Butorova O. F., Narzyaev V. V. Osobennosti rosta, semenosheniya 30–35-letnih ramet i polusibov plyusovyh derev'ev sosny kedrovoj sibirskoj (yug Srednej Sibiri). Krasnoyarsk : SibGU im. M. F. Reshetneva, 2021. 208 s.

15. Matveeva R. N., Butorova O. F., Komarnickij V. V. Izmenchivost' pokazatelej sosny kedrovoj sibirskoj vo vtorom pokolenii na plantacii «LEP-2». Krasnoyarsk : SibGU im. M. F. Reshetneva, 2024. 208 s.

16. Titov E. V. Kedr. Car' sibirskoj tajgi. Sankt-Peterburg : Dilya, 2020. 288s.

17. Titov E. V. Orekhoproductivnye kedrovye plantacii i lesosady. Voronezh : VGTU, 2021. 264 s.

18. Titov E. V. Vozrastnaya hronologicheskaya izmenchivost' pokazatelej plodonosheniya klonov kedra sibirskogo // Hvojnye boreal'noj zony. 2021. T. 39, № 1. S. 39–44.

19. Shcherba Yu. E., Kopychenko D. E., Poplyujkova M. V. Izmenchivost' 36-letnih polusibov plyusovyh derev'ev kedra sibirskogo po reproductivnomu razvitiyu na plantacii «Ermaki» // Plodovodstvo, semenovodstvo i introdukcija drevesnyh rastenij. Krasnoyarsk : SibGU im. M. F. Reshetneva, 2020. T. 23. S. 157–160.

20. Zhuk E., Goroshkevich S. Groth and reproduction in *Pinus sibirica* ecotypes from Western Sibirica in a common garden experiment // New Forests, 2018. Vol. 49, № 2. P. 159–172.

© Коростелев А. С., Щерба Ю. Е., 2025

Поступила в редакцию 10.02.2025

Принята к печати 04.08.2025

ИЗМЕНЕНИЕ ЗАПАСОВ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РУБОК УХОДА В МОЛОДЫХ ЛЕСАХ ПРИОНЕЖСКОГО РАЙОНА РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИЯ*

О. Н. Галактионов, А. А. Васильев, М. А. Елхова, Е. А. Кемпи

Петрозаводский государственный университет
Российская Федерация, Республика Карелия, 185910, г. Петрозаводск, просп. Ленина, 33
E-mail: elxx@mail.ru

Аннотация. Изменение климата в результате увеличения выбросов углекислого газа в атмосферу является важной общемировой проблемой. Леса и лесной сектор могут играть значительную роль в достижении этой цели, так как являются важнейшими поглотителями углерода. Практика лесоуправления может поддерживать или увеличивать поглощение и запасаение углерода в лесах. Значимую роль в лесоуправлении играют мероприятия по уходу за лесом, такие как рубки осветления и прочистки, прореживание, проходные и санитарные рубки. В статье рассмотрены данные по запасам древостоя, таксационные данные и информация по рубкам ухода согласно учетных книгам двух лесничеств РК: Педасельга и Пяжиева-Сельга. Учет производился на протяжении 20 лет: с 1996 по 2016 год. Данные были структурированы и оцифрованы. Был проведен анализ данных, выявлены зависимости увеличения прироста древостоя от таких параметров, как временной интервал между рубками ухода, объем вырубленной древесины, изменение относительной полноты и породного состава. В работе сформулированы рекомендации по проведению рубок ухода в молодых лесах республики Карелия в соответствии с полученными выводами на основании выявленных закономерностей. Полученные рекомендации направлены на увеличение прироста древесины и уменьшении выбросов углерода в окружающую среду.

Ключевые слова: Рубки ухода, анализ данных, лесной сектор, запасы древесины, молодые леса, снижение выбросов углерода, экологическая рента.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 4, P. 32–39

CHANGES IN WOOD STOCKS DURING CARE CUTS IN YOUNG FORESTS OF THE PRIONEZHISKY DISTRICT OF THE REPUBLIC OF KARELIA

O. N. Galaktionov, A. A. Vasiliev, M. A. Elkhova, E. A. Kempfi

Petrozavodsk State University
33, Lenin Av., Petrozavodsk, 185910, Republic of Karelia, Russian Federation
E-mail: elxx@mail.ru

Annotation. Climate change resulting from increased carbon dioxide emissions into the atmosphere is an important global issue. Forests and the forestry sector can play a significant role in achieving this goal, as they are crucial carbon sinks. Forest management practices can support or enhance carbon absorption and storage in forests. Significant activities in forest management include care measures such as thinning and cleaning cuts, selective logging, and sanitary cuts. The article examines data on stand volumes, inventory data, and information on care cuts according to the records of two forestry units in the Republic of Karelia: Pedaselga and Pyazhieva-Selga. The accounting was conducted over 20 years: from 1996 to 2016. The data was structured and digitized. An analysis was conducted, revealing dependencies of the increase in stand growth on parameters such as the time interval between care cuts, the volume of felled timber, changes in relative density, and species composition.

The paper formulates recommendations for care cuts in young forests of the Republic of Karelia in accordance with the findings based on the identified patterns. The recommendations are aimed at increasing timber growth and reducing carbon emissions into the environment.

Keywords: Care cuts, data analysis, forest sector, timber reserves, young forests, reducing carbon emissions, environmental rent

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 075-03-2023-128).

ВВЕДЕНИЕ

Изменение климата в сторону повышения средних температур является общемировой проблемой и Российская Федерация с 2016 года является страной участником Парижского соглашения [1] – соглашения в рамках Рамочной конвенции ООН в об изменении климата. Цель Парижского соглашения – удержание прироста глобальной средней температуры ниже 2 градусов С сверх доиндустриальных показателей. Леса и лесной сектор могут играть значительную роль в достижении этой цели, так как являются важнейшими поглотителями углерода. В настоящее время в России нет углеродных квот, но в дальнейшем вполне вероятно возникновение рынка регулирования объемов выбросов и поглощения углекислого газа. Таким образом, экологичное ведение лесного хозяйства может позволить получать экономическую прибыль с помощью продаж углеродных квот предприятиям, которым не достаточно собственных [2].

Российская Федерация обладает значительными лесными ресурсами, и Республика Карелия является одним из богатейших в этом плане субъектом – более 55 % территории республики покрыто лесами. Но, несмотря на то, что леса являются возобновляемым ресурсом, им требуется грамотное и эффективное управление. Практика лесопользования может поддерживать или увеличивать поглощение и запасаение углерода в лесах. В свою очередь, к управлению лесными ресурсами должен применяться комплексный и целостный подход, включающий в себя большое количество мероприятий [3].

Важность применения рубок ухода для увеличения запаса древесины и соответственно увеличения консервации углерода неоднократно была отмечена в литературе [4; 5]. С целью изучения динамики углерода разворачиваются углеродные полигоны [6]. Также разработаны и апробированы системы расчета углерода в лесных экосистемах [7; 8].

Несплошные рубки также являются одним из путей поддержания углерододепонирующей функции леса [9]. Но существует мнение, что рубками ухода значительно увеличить невозможно, так как существуют определенные закономерности в росте и развитии древостоя, которые накладывают ограничения на показатели прироста [10]. Но в случае грамотного и системного подхода к рубкам ухода, качественным их проведением прирост древесины можно увеличить в пределах 10 % [11].

Одним из этих мероприятий может являться план оптимального проведения рубок ухода с целью увеличения прироста древостоя, что соответственно способствует консервации углерода в древесине. В настоящее время получил распространение скандинавский метод ведения лесного хозяйства, который основан на изучении опыта Финляндии и Швеции. Данная концепция направлена на увеличение объема и повышения качества вырубленной древесины, то есть на интенсификацию использования потенциала лесной отрасли [12]. В действительности данный метод не является однозначным. Он основан на омоложении лесов, что может оказывать негативное влияние на лесную экосистему в будущем. Также огромную роль

играет качество выполнения рубок ухода, при некорректном их проведения эффект от их проведения может нивелироваться. Механизированные несплошные рубки леса сопровождаются повреждением деревьев древостоя. Количество повреждаемых деревьев и размеры повреждений во многом зависят от выбранной технологии, техники и дополнительного оборудования для проведения рубки. И в случае некорректного проведения могут не только не увеличить количество прироста древостоя а, наоборот, изменить этот показатель в отрицательную сторону [13].

Стоит отметить, что оценка влияния рубок ухода на изменение прироста древесины на практике является процессом длительным, то есть на лесосеке должно пройти не одно десятилетие для формирования необходимых данных о количестве прироста и характере проведения рубок. В связи с этим важным аспектом является использование уже имеющихся региональных данных для проведения исследования. В данной работе были использованы лесные книги с 2-х лесничеств в Республике Карелия, которые заполнялись работниками на протяжении 20 лет. Несмотря на общемировой тренд на компьютеризацию и использование цифровых баз данных для хранения информации, лесничества находятся в отдаленных районах республики и учет осуществлялся в рукописном виде.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

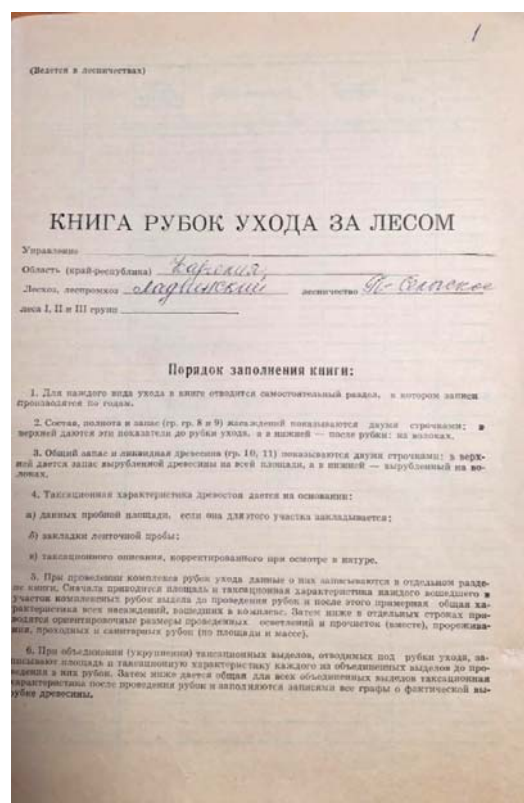
В рамках данной работы рассмотрены 2 книги по 2-м учетно-хозяйственным единицам РК: Педасельга и Пяжиева-Сельга. Книги велись в рукописном виде на протяжении 20 лет: с 1996 по 2016 год. Фотографии обложки и первой страницы в книге рубок ухода в пгт Педасельга представлены на рис. 1.

В них вносились данные по проведению рубок ухода: осветления и прочистки, прореживание, проходные и санитарные рубки. Указаны характеристики лесных выделов – породный состав, полнота, возраст лесов, класс бонитета и объем проведенных работ. Пример заполненной страницы по проведенным рубкам ухода на участках приведен на рис. 2.

Данные были оцифрованы и структурированы в ПО MS Excel. Так как каждая книга велась на протяжении достаточно длительного времени, принято во внимание, что данные заносились разными людьми с разной степенью ответственности к своей работе. Представляет интерес проанализировать данные с целью выявления участков, которые за этот период подвергались рубке ухода 2 и более раз для выявления факторов, оказывающих влияние на увеличение запасов древостоя. В результате анализа было выявлено следующее.

1. 3 участка, в которых были проведены работы по рубкам ухода 3 раза (3 вхождения):

Из 3 участков в пункте 1 для проведения дальнейших исследований представляется возможным только 1 участок: по другим выделам либо неполная информация по запасам и проведенным рубкам, либо очень маленький временной интервал между проведенными рубками (1 год), т. е. данные для проведения дальнейшего проведения анализа являются недостаточными.

 a 

6

Рис. 1. Фотографии книги рубок ухода за лесом «Педасельгское лесничество»

a – обложка книга; b – первая (титульная) страница

[illegible]

Рис. 2. Пример заполнения страниц книги рубок ухода за лесом «Педасельгское лесничество»

2. 37 участков, в которых рубки ухода были проведены дважды.

Из 37 участков выбраны 28, у которых есть полная информация по объемам вырубок и запасам. По этим участкам и предполагается дальнейшее исследование. Представляет интерес динамика запасов древесины, и от каких факторов зависит величина изменения запасов в большую или меньшую сторону и за какой период времени наблюдаемый прирост происходит.

Логичным является предположить, что на изменение прироста древесины оказывают влияние следующие параметры:

- временной интервал между приемами рубок;
- полнота древостоя;
- объем вырубленной древесины;
- породный состав участка;
- класс бонитета и другие факторы.

Достаточный объем информации, содержащийся в полученной выборке, предоставляет возможным провести анализ их влияния на прирост древесины.

Таким образом, целью предполагаемого исследования являлось определение факторов, которые оказали наиболее значительное влияние на прирост запаса

древесины. Для обработки использовались методы математической статистики.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Произведена предварительная обработка данных. Для этого проведен расчет количественного увеличения запасов древесины после проведения первой рубки ухода и перед проведением второй (т. е. рассматривается абсолютный прирост) в процентном соотношении и в м³ на га. Рассматриваемые данные представлены в табл. 1.

Следующим шагом в проведенном исследовании являлось изучение значимости влияния параметров, значения которых фиксировались в лесной книге на прирост древесины.

В первую очередь проанализирована зависимость прироста древесины от интервала времени между рубками: размах временного периода составляет от 4 до 10 лет, модальное значение – 5 лет, среднее значение – 6,8 лет. На основе имеющихся данных был построен график, отображающий зависимость, представленный на рис. 3.

Таблица 1

Увеличение запасов древесины после первой и второй рубки соответственно

Порядковый номер	№ участка/выдела	Количество древесины до 1-й рубки, м ³	Количество древесины после 1-й рубки, м ³	Количество древесины до 2-й рубки, м ³	Количество древесины после 2-й рубки, м ³	Прирост древесины, %	Прирост древесины, м ³
1	7\8	35	27	35	26,8	29,63	8
2	9\14	30	21,9	30	24	36,99	8,1
3	10\45	24	18	24	18	33,33	6
4	11\31	25	17	24	18	41,18	7
5	12\34\40\41	25	17	24	18	41,18	7
6	17\6	23,2	17,4	46,4	34,8	166,67	29
7	37\8	20	11,5	30	24	160,87	18,5
8	37\14	20	11,7	31	25	164,96	19,3
9	40\40	15	7	30	22	328,57	23
10	40\41	15	7	30	22	328,57	23
11	24\12	15	7,2	30	24	316,67	22,8
12	30\29	26	19,5	25	17,5	28,21	5,5
13	34\13	15	7,1	30	20	322,54	22,9
14	34\15	15	7,2	30	20	316,67	22,8
15	40\16	22	14,3	21	15	46,85	6,7
16	40\16	21	15	24	18	60,00	9
17	41\19	25	14,7	26	18	76,87	11,3
18	42\31	24	18	21,8	14	21,11	3,8
19	45\7	21	15	15	14	0,00	0
20	46\1	15	6,9	30	24	334,78	23,1
21	46\3	15	6,5	29	23	346,15	22,5
22	46\5	15	5,2	30	24	476,92	24,8
23	46\8	15	7	29	23	314,29	22
24	46\13	15	5,5	29	23	427,27	23,5
25	51\2	15	7	30	22	328,57	23
26	51\8	15	7,5	30	22	300,00	22,5
27	51\12	15	7	25	17	257,14	18
28	52\1	15	7,2	17	7,8	136,11	9,8

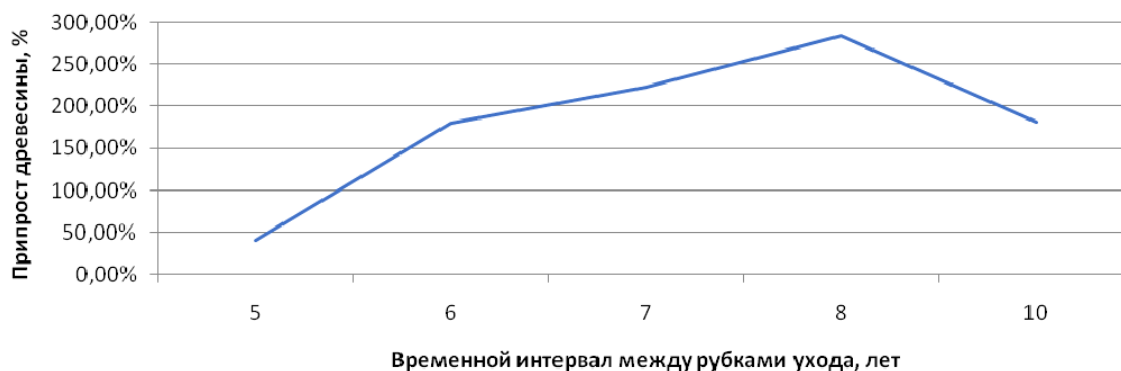


Рис. 3. Изменение запасов древесины в зависимости от временного интервала между проведенными рубками ухода

По графику видно, что при значениях временного интервала от 5 до 8 лет наблюдается возрастание прироста, затем достигается его максимум в точке равной интервалу продолжительностью 8 лет и далее происходит убывание прироста древесины. Снижение прироста между значениями 8 и 10 лет можно объяснить недостаточностью данных по лесным участкам пройденным несплошными рубками с интервалом 10 лет, таким образом можно утверждать, что взаимосвязь есть и наблюдается тенденция к увеличению прироста древесины в зависимости от увеличения временного интервала между рубками.

Следующий параметр, который рассматривался – это класс бонитета. В наблюдаемой выборке участки характеризуются всего двумя классами: 3-м и 4-м классом, что объясняется природно-климатическими условиями рассматриваемой местности. В связи ограниченным количеством классов бонитета, малочисленностью одного из представленных классов дальнейший анализ в этом направлении не проводился.

Далее рассмотрен состав произрастающих пород в данной местности и его влияние на прирост древесины. На участках состав пород представлен 4 видами: ель, береза, сосна и осина. Для того, что проанализировать зависимость введен дополнительный параметр K_x , характеризующий состав пород – коэффициент доли хвойного древостоя. Параметр рассчитан как соотношение количества хвойных пород к сумме количества берез и осин согласно формуле (1).

$$K_x = \frac{n_e + n_c}{n_{oc} + n_{бер}}, \quad (1)$$

где n_e – количество елей на рассматриваемом участке, шт.; n_c – количество сосен на рассматриваемом участке, шт.; n_{oc} – количество осин на одном участке, шт.; $n_{бер}$ – количество берез на рассматриваемом участке, шт.

Следовательно, увеличение значения коэффициента свидетельствует о том, что увеличивается количество хвойных деревьев. Выбор обусловлен тем, что сосна является целевой породой во многих регионах РК. Было проведено разбиение на 4 группы и по

каждой вычислено среднее выборочное значение прироста.

Результаты представлены в виде гистограммы на рис. 4.

Наибольший прирост древесины наблюдается в случаях, когда хвойные и лиственные породы присутствуют примерно в равных долях и при абсолютном преобладании хвойных деревьев (в 3 и более раза). Данный аспект предположительно является территориальной особенностью рассматриваемой местности.

Следующим рассматриваемым фактором в данном исследовании является относительная полнота насаждений. Аналогично предыдущему пункту добавлен параметр Δ , характеризующий изменение полноты до и после рубки, т. е. разность между полнотой до 1-й рубки и после ее проведения. Δ вычисляется согласно формуле (2):

$$\Delta = P_{до} - P_{после}, \quad (2)$$

где $P_{до}$ – значение относительной полноты на заданном участке до проведения рубки ухода; $P_{после}$ – значение относительной полноты на заданном участке после проведения рубки ухода.

Диапазон изменения параметра составляет от 0,1 до 0,4. Увеличение значения изменения полноты свидетельствует об увеличении изреженности участка. Проанализировано изменение прироста древесины в зависимости сразу от двух параметров: от изменения полноты, т. е. степени изреженности участка и от временного интервала между рубками.

В результате сформирован пространственный график, представленный на рис. 5.

На графике поверхности видно, что присутствуют локальные точки максимума прироста древесины. Этим локальным пикам соответствуют значения прироста при временном интервале 6 лет и изменению относительной полноты на 0,2 и 0,3 единицы; а также при временном интервале 8 лет и изменению полноты на 0,3 и 0,4 единицы. Таким образом, можно сделать выводы о значимом влиянии полноты на прирост древесины: чем сильнее прореживается участок, тем больше можем наблюдать увеличение прироста древесины.

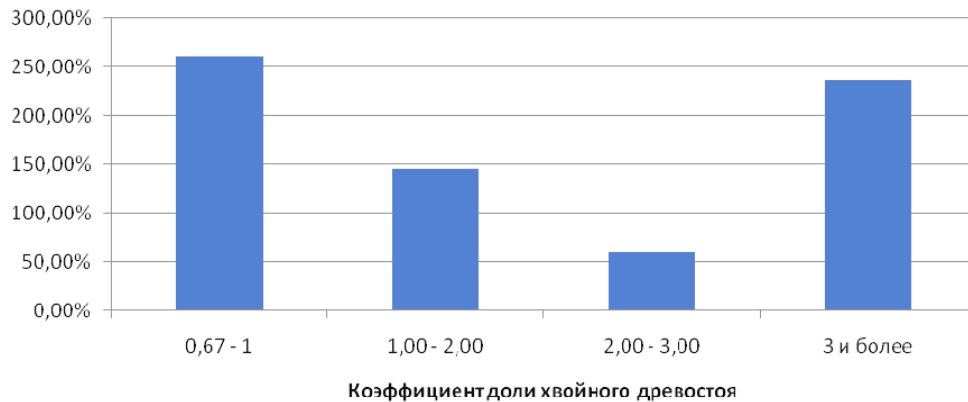


Рис. 4. Изменение запаса древесины в зависимости от породного состава

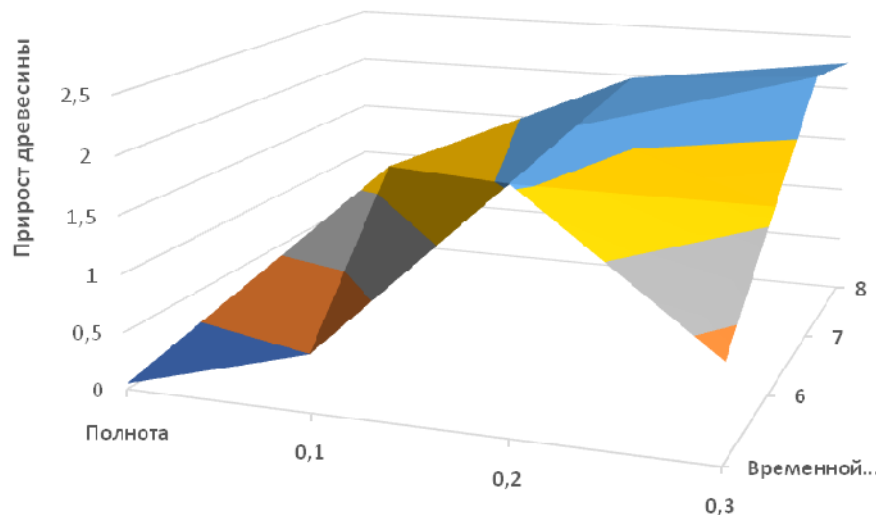


Рис. 5. Графическая зависимость прироста древесины от изменения полноты и временного интервала между рубками

Также рассмотрено влияние только относительной (без учета временного интервала между рубками ухода) полноты на прирост древостоя. График полученной зависимости представлен на рис. 6. В этом случае зависимость хорошо описывается квадратичной функцией со следующими коэффициентами, представленной в формуле (3):

$$y = 0,3233x^2 - 0,8451x + 2,1088. \quad (3)$$

Стоит отметить, данное уравнение достаточно хорошо характеризует изменение прироста древесины в зависимости от изменения полноты на участке лесо-

секи, так как коэффициент детерминации равен 0,95. Такой результат можно объяснить тем, что рассматривались молодые леса с их региональной специфической характеристик.

Последним рассматриваемым параметром в данном исследовании является объем изымаемой древесины в процессе проведения рубки ухода. Вариативность его незначительна, так как должны соблюдаться требования нормативных документов, в которых этот объем регламентирован, но тем не менее размах от 6 м³ на га до 9,8 м³ на га присутствует. График зависимости представлен на рис. 7.

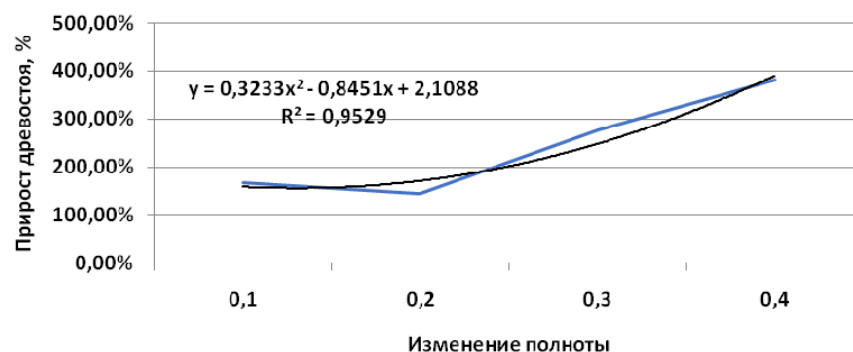


Рис. 6. График зависимости прироста древесины от изменения полноты на рассматриваемом участке

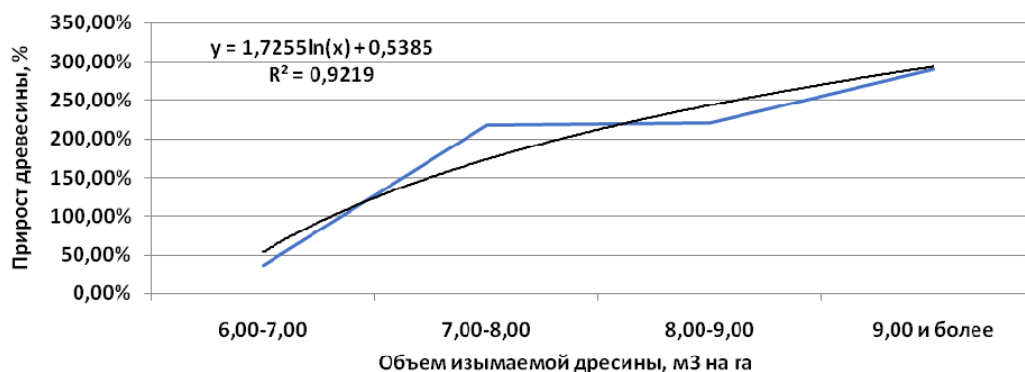


Рис. 7. График зависимости прироста древесины от объема вырубki

График зависимости прироста древесины от объема вырубki получилась в виде возрастающей функции. Рассматриваемую зависимость можно охарактеризовать логарифмической функцией (4):

$$y = 1,7255 \ln x + 0,5385. \quad (4)$$

Таким образом, чем больше древостоя было вырублено, тем более очевиден прирост по отношению к значениям после вырубki, что объясняется отсутствием внутривидовой конкуренции и, следовательно, увеличением ресурсов для формирования нового прироста.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе рассмотрены основные таксационные характеристики леса и произведена статистическая обработка имеющихся ретроспективных данных. Выявлена зависимость количества прироста древостоя от следующих факторов: объема вырубki, изменения полноты и временного интервала. Увеличение данных параметров в рассматриваемых пределах приводит к увеличению значения прироста древостоя. Произрастающие породы, и их состав, оказывают также влияние: максимальный прирост в рассматриваемой местности обеспечивают абсолютное преобладание хвойных растений над лиственными (в три и более раза), а также примерно равное их соотношение. Для анализа класса бонитета имеющихся данных оказалось недостаточно.

На основании сделанных выводов могут быть разработаны следующие рекомендации по проведению рубок ухода в молодых лесах на территории республики Карелия с целью использования максимального потенциала разрабатываемой лесосеки и уменьшению углеродных эмиссий в окружающую среду:

1. Рубки ухода в молодых лесах должны проводиться не однократно в течение оборота рубки, а это должен быть регулярный процесс. Рекомендуемый временной интервал между проведением рубок должен составлять 7–8 лет.

2. Объем изымаемой древесины при проведении рубок ухода в молодых лесах рекомендуется принимать 20–30 % от общего объема древостоя на участке лесосеки.

3. Особое внимание для организации проведения рубок ухода в молодых лесах следует уделять участкам, на которых наблюдается породное разнообразие

древостоя, то есть присутствуют в равной мере хвойные и лиственные породы. Положительным моментом в этом случае является тот факт, что сосна и ель депонируют углерод на значительно более длительный период, чем мягкие лиственные породы. Но в этом случае необходимо обязательно уделять тщательное внимание противопожарным мероприятиям на данных участках лесосеки.

Следует отметить, что данные, на которых проводились исследования, имеют некую специфичность: это определенная территория республики Карелия, возраст лесов преимущественно молодой (преимущественно возрастная категория составляет 10–20 лет) и не были учтены природно-климатические особенности, которые могли иметь место (но явных аномалий выявлено не было). Представляет интерес провести аналогичные исследования инвентарного лесного учета уже других территориально-административных единиц республики, лесных насаждений более широкого круга возрастов с целью проверки и корректировки текущих результатов, а также для анализа изменения поведения прироста древостоя с ростом возраста насаждений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Парижское соглашение (на русс. яз.). URL: <http://economy.gov.ru> (дата обращения: 01.01.2025).
2. Лапицкая О. В. Теория устойчивого природопользования и принципы устойчивого лесопользования как научная основа управления лесами и лесным хозяйством Беларуси // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. 2023. № 1(92). С. 48–56
3. Леса России и изменение климата. Что нам может сказать наука / П. Лескинен, М. Линдлер, П. Й. Веркерк, Г. Я. Набуурс, Й. Ван Брусселен, Е. Куликова, М. Хассегава, Б. Леринк (ред.). Европейский институт леса, 2020.
4. Глобальный климат и почвенный покров – последствия для землепользования России / А. Л. Иванов, И. Ю. Савин, В. С. Столбовой, Ю. А. Духанин, Д. Н. Козлов, И. М. Баматов // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. 2021. № 107. С. 5–32. DOI: 10.19047/0136-1694-2021-107-5-32.
5. Желдак В. И., Сычева А. Н., Дороженкова Э. В., Липкина Т. В., Прока И. Ю. Лесоводственная оценка потенциала влияния рубок ухода на депонирование и сохранение углерода лесными экосистемами // Эколо-

гия и природопользование: прикладные аспекты : материалы XII Международной научно-практической конференции. 2022. С. 85–96.

6. Лесоводственные меры повышения эффективности депонирования углерода лесами, осуществляемые в рамках перехода к системному ведению лесного хозяйства в условиях изменения климата / В. И. Желдак, А. А. Кулагин, Э. В. Дорошенкова, А. Н. Сычева, И. Ю. Прока // Актуальные проблемы развития лесного комплекса : материалы XX Международной научно-технической конференции. 2022. С. 34–38.

7. Швиденко, А. З., Щепашенко Д. Г. Углеродный бюджет лесов России // Сибирский лесной журнал. 2014. № 1. С. 69–92.

8. Шварц Е. А., Птичников А. В. Стратегия низкоуглеродного развития России и роль лесов в ее реализации // Научные труды Вольного экономического общества России. 2022. № 4. С. 399–426.

9. Рожков Л. Н., Шатравко В. Углеродный баланс на этапе формирования молодого насаждения в связи со способом главной рубки леса // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2019. № 2 (222). С. 66–73.

10. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии: нормативно-справочные материалы / А. З. Швиденко, Д. Г. Щепашенко, С. Нильсон, Ю. И. Булуй. 2-е изд., доп. М. : Федеральное агентство лесного хозяйства Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, 2008. 886 с.

11. Лесоводственная оценка потенциала влияния рубок лесовозобновления на депонирование и сохранение углерода лесными экосистемами / В. И. Желдак, А. Н. Сычева, Э. В. Дорошенкова, Т. В. Липкина, И. Ю. Прока // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2022. № 61. С. 88–93.

12. Марковский А. В., Родионов А. В., Поташов В. Н. Некоторые особенности лесопользования в Швеции и Финляндии // Resour. Technol. 2012. № 1.

13. Васякин Е. А., Добрынин Ю. А. Повреждаемость деревьев при выборочных рубках // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2017. № 219. С. 120–132. DOI 10.21266/2079-4304.2017.219.120-132.

REFERENCES

1. Parizhskoe soglasenie (na russ. yaz.). URL: <http://economy.gov.ru> (data obrashcheniya: 01.01.2025).

2. Lapickaya O. V. Teoriya ustojchivogo prirodnopol'zovaniya i principy ustojchivogo lesopol'zovaniya kak nauchnaya osnova upravleniya lesami i lesnym hozyajstvom Belarusi // Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P. O. Suhogo. 2023. № 1(92). С. 48–56

3. Lesa Rossii i izmenenie klimata. Chto nam mozhets kazat' nauka / P. Leskinen, M. Lindler, P. J. Verkerk,

G. Ya. Nabuurs, J. Van Brusselen, E. Kulikova, M. Hassegava, B. Lerink (red.). Evropejskij institut lesa. 2020.

4. Global'nyĭ klimat i pochvennyĭ pokrov – posledstviya dlya zemlepol'zovaniya Rossii / A. L. Ivanov, I. Yu. Savin, V. S. Stolbov, Yu. A. Duhanin, D. N. Kozlov, I. M. Bamatov // Byulleten' Pochvennogo instituta imeni V. V. Dokuchaeva. 2021. № 107. С. 5–32. DOI: 10.19047/0136-1694-2021-107-5-32.

5. Lesovodstvennaya ocenka potentsiala vliyaniya rubok uhoda na deponirovanie i sohranenie ugleroda lesnymi ekosistemami / V. I. Zheldak, A. N. Sycheva, E. V. Doroshchenkova, T. V. Lipkina, I. Yu. Proka // Ekologiya i prirodnopol'zovanie: prikladnye aspekty : materialy XII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2022. С. 85–96.

6. Lesovodstvennye mery povysheniya effektivnosti deponirovaniya ugleroda lesami, osushchestvlyаемые v ramkah perekhoda k sistemnomu vedeniyu lesnogo hozyajstva v usloviyah izmeneniya klimata / V. I. Zheldak, A. A. Kulagin, E. V. Doroshchenkova, A. N. Sycheva, I. Yu. Proka // Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa : materialy XX Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. 2022. С. 34–38.

7. Shvidenko A. Z., Shchepashchenko D. G. Uglerodnyĭ byudzhets lesov Rossii // Sibirskij lesnoj zhurnal. 2014. № 1. С. 69–92.

8. Shvarc E. A., Ptichnikov A. V. Strategiya nizko-uglerodnogo razvitiya rossii i rol' lesov v ee realizacii // Nauchnye trudy Vol'nogo ekonomicheskogo obshchestva Rossii. 2022. №4. С. 399–426.

9. Rozhkov L. N., Shatravko V. Uglerodnyĭ balans na etape formirovaniya mladogo nasazhdeniya v svyazi so sposobom glavnoj rubki lesa // Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe hozyajstvo, prirodnopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyаемых resursov. 2019. № 2 (222). С. 66–73.

10. Tablicy i modeli hoda rosta i produktivnosti nasazhdenij osnovnyh lesoobrazuyushchih porod Severnoj Evrazii: normativno-spravochnye materialy / A. Z. Shvidenko, D. G. Shchepashchenko, S. Nil'son, Yu. I. Buluj. 2-e izdanie, dopolnennoe. Moskva : Federal'noe agentstvo lesnogo hozyajstva Ministerstva sel'skogo hozyajstva Rossijskoj Federacii, 2008. 886 s.

11. Lesovodstvennaya ocenka potentsiala vliyaniya rubok lesovozobnovleniya na deponirovanie i sohranenie ugleroda lesnymi ekosistemami / V. I. Zheldak, A. N. Sycheva, E. V. Doroshchenkova, T. V. Lipkina, I. Yu. Proka // Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa. 2022. № 61. С. 88–93.

12. Markovskij A. V., Rodionov A. V., Potashov V. N. Nekotorye osobennosti lesopol'zovaniya v Shvecii i Finlyandii // Resour. Technol. 2012. №1.

13. Vasyakin E. A., Dobrynin Yu. A. Povrezh-daemost' derev'ev pri vyborochnykh rubkakh // Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii. 2017. № 219. С. 120–132. DOI 10.21266/2079-4304.2017.219.120-132.

© Галактионов О. Н., Васильев А. А.,
Елхова М. А., Кемпи Е. А., 2025

Поступила в редакцию 20.03.2025
Принята к печати 04.08.2025

**ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ РАЗВИТИЯ АССИМИЛЯЦИОННОГО АППАРАТА
БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ МЕТОДАМИ ДЕНДРОИНДИКАЦИИ
(на примере скверов города Красноярска)**

Е. В. Авдеева, И. В. Кухар

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: Rahuk@mail.ru

Аннотация. Роль зелёных насаждений, и отдельных пород в частности, в улучшении экологической комфортности городской среды общепризнанна. Ввиду значительной гетерогенности антропогенного воздействия и его специфических характеристик в пределах городской среды, внедрение конкретных видов древесной растительности в практику озеленения должно предваряться комплексной оценкой их адаптивности к локальным условиям и типам насаждений. Рекомендации по масштабному применению дендрофлоры возможны лишь после детального исследования резистентности растений к существующей техногенной нагрузке в конкретных городских биотопах. Учет специфики загрязнения и категории насаждений является необходимым условием успешной интродукции и устойчивого развития древесных растений в урбанизированной среде.

Предложен метод определения оценки качества условий произрастания растений по показателю асимметричности площади половинок листовых пластин древесных растений. Объектом исследования служили средневозрастные растения берёзы повислой, находящихся в одинаковых условиях по уровню освещенности, влажности, но с различной интенсивностью антропогенной нагрузки. Для оценки устойчивости развития *Betula pendula* использовали два критерия: коэффициент асимметрии, определяемый по пяти листовым параметрам, и индекс асимметричности, рассчитанный на основе площади половинок листьев с применением методов В. М. Захарова [Захаров, 1987] и модифицированной авторской методики.

Анализ корреляции между площадью листовых пластинок и степенью загрязнения окружающей среды продемонстрировал общую тенденцию к снижению стабильности развития. Обнаружены статистически значимые обратные корреляции: повышение техногенной нагрузки приводит к уменьшению площади листовых пластинок *Betula pendula* и усилению их асимметрии.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанная и протестированная методика биоиндикации, основанная на анализе асимметрии листовых пластинок через соотношение площадей их половинок, корректно отражает происходящие изменения в окружающей среде. Данный метод может быть рекомендован для оперативной оценки качества городской среды в рамках экологического мониторинга.

Ключевые слова: городские искусственные насаждения, мониторинг, биоиндикация, лист, береза повислая, асимметрия.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 4, P. 40–49

**EVALUATION OF THE STABILITY OF DEVELOPMENT OF THE ASSIMILATION APPARATUS
OF DROOPING BIRCH USING DENDROINDICATION METHODS
(using the example of public gardens in Krasnoyarsk)**

E. V. Avdeeva, I. V. Kukhar

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: Rahuk@mail.ru

Annotation. The role of green spaces, and individual species in particular, in improving the environmental comfort of the urban environment is generally recognized. Due to the significant heterogeneity of anthropogenic impact and its specific characteristics within the urban environment, the introduction of specific types of woody vegetation into landscaping practices should be preceded by a comprehensive assessment of their adaptability to local conditions and types of plantings. Recommendations for the large-scale use of dendroflora are possible only after a detailed study of plant resistance to the existing technogenic load in specific urban biotopes. Taking into account the specifics of pollution and the category of plantings is a prerequisite for the successful introduction and sustainable development of woody plants in an urbanized environment. A method is proposed for determining the assessment of the quality of plant growing conditions based on the asymmetry of the area of halves of leaf blades of woody plants. The object of the study

was middle-aged silver birch plants, located in the same conditions in terms of illumination and humidity, but with different intensities of anthropogenic load. To assess the sustainability of *Betula pendula* development, two criteria were used: the asymmetry coefficient determined by five leaf parameters, and the asymmetry index calculated based on the area of leaf halves using the methods of V. M. Zakharov [Zakharov, 1987] and a modified author's method.

Analysis of the correlation between the area of leaf blades and the degree of environmental pollution demonstrated a general tendency towards a decrease in the stability of development. Statistically significant inverse correlations were found: an increase in technogenic load leads to a decrease in the area of *Betula pendula* leaf blades and an increase in their asymmetry.

The results obtained indicate that the developed and tested bioindication method based on the analysis of leaf blade asymmetry through the ratio of the areas of their halves correctly reflects the changes occurring in the environment. This method can be recommended for the prompt assessment of the quality of the urban environment as part of environmental monitoring.

Keywords: urban artificial plantations, monitoring, bioindication, leaf, drooping birch, asymmetry.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из ключевых индикаторов комфортности городской среды является степень обеспеченности населения территориями, занятыми зелеными насаждениями. Природно-климатические факторы местности оказывают значительное влияние на планирование, развитие и модернизацию городов, определяя направления их пространственного расширения и концентрацию промышленных и транспортных узлов.

В городских скверах, парках, на улицах и площадях все большее распространение получают местные виды древесных растений. Однако, учитывая гетерогенность техногенного воздействия на различные участки городской территории и его специфику, рекомендации по интенсивному использованию тех или иных видов деревьев могут быть сформулированы только после анализа их адаптивности к конкретным условиям и категориям зеленых насаждений. Многочисленные научные исследования подтверждают, что древесные растения могут служить инструментами мониторинга состояния городской среды, поскольку их таксационные (высота, диаметр ствола и кроны) и морфологические характеристики (размеры листовой пластинки и прочие) отражают уровни экологической опасности в городской среде [1–5; 10; 12; 13; 15; 19; 20].

В ряде научных работ береза повислая рассматривается как индикатор качества городской среды, при этом в качестве признаков-маркеров выступают разнообразные показатели, включая жизненный потенциал вида, морфометрические параметры, индекс стабильности развития и другие [6; 9; 10; 11; 18; 22].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования служили средневозрастные растения березы повислой (*Betula pendula* Roth.), находящиеся в одинаковых условиях по уровню освещенности, влажности, но с различной интенсивностью антропогенной нагрузки.

Методология биоиндикации базируется на теории «стабильности развития», предложенной А. В. Яблоковым, В. М. Захаровым и их коллегами [8], которые эмпирически продемонстрировали, что негативные внешние факторы индуцируют изменения в стабильности онтогенеза живых организмов, что проявляется в нарушениях морфогенетических процессов. Эти нарушения, в свою очередь, поддаются количественной оценке.

Оценка флуктуирующей асимметрии билатеральных организмов, как индикатора антропогенного воздействия, является надежным и широко используемым методом. В дендроиндикации, основанной на данном подходе, древесные растения служат в качестве модельных объектов для мониторинга антропогенной нагрузки. Древесные растения, будучи прикрепленными к конкретной территории на протяжении всего жизненного цикла, испытывают кумулятивное воздействие как почвенной, так и воздушной среды, отражающее интегральную картину экологической обстановки.

Сбор образцов осуществлялся в начале сентября, после завершения фазы активного роста листового аппарата, но до начала процесса осеннего опадения листвы, что позволяло избежать искажений результатов, связанных с естественным старением тканей. Листья отбирались из нижней части кроны, с укороченных побегов (рис. 1, а), расположенных на ветвях, ориентированных по всем сторонам света, для обеспечения репрезентативности выборки и минимизации влияния локальных факторов. Собранный материал (рис. 1, б) сканировался с разрешением 300 dpi.

Для достижения большей достоверности, анализ собранных данных осуществлялся с применением программного обеспечения КОМПАС. С каждого листа были получены данные по пяти характеристикам, измеренным с левой и правой сторон: 1 – ширина половины листа (см. рис. 2, а); 2 – длина второй боковой жилки, отсчитанной от основания; 3 – дистанция между основаниями первой и второй боковых жилок; 4 – дистанция между кончиками этих же жилок; 5 – угол между центральной жилкой и второй боковой жилкой; идущей от основания. Оценка стабильности развития изучаемых видов осуществлялась на основе двух индикаторов: индекса асимметрии, рассчитанного по пяти параметрам листовой пластинки (согласно методу В. М. Захарова) [7], и индекса асимметрии, определенного по площади половин листа (по авторской методике). Измеряемые характеристики листа березы повислой изображены на рис. 2, б.

Для определения степени асимметрии использовался метод, предложенный В. М. Захаровым и соавторами, основанный на интегральном показателе – среднем относительном отклонении по каждому изучаемому признаку (параметру). Величины измерений, полученные для левой и правой сторон, обозначались

как $X_{\text{л}}$ и $X_{\text{п}}$, соответственно. Флуктуирующая асимметрия листовых пластинок рассчитывалась как частное от деления разности между значениями, полученными для левой и правой сторон, на их сумму.

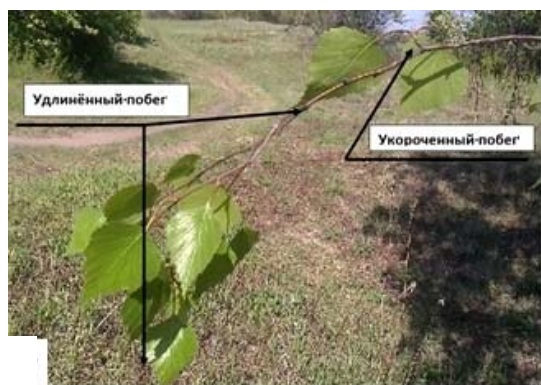
Для каждого листа рассчитывалось относительное расхождение признака между сторонами как среднее арифметическое относительных разностей признаков между левой и правой сторонами. Среднее относительное расхождение признака для всей выборки рассчитывалось как среднее арифметическое относительных расхождений сторон на признак для каждого листа.

Полученный показатель отражает степень асимметрии организма, для оценки которой В. М. Захаровым и соавторами предложена шкала отклонений. В этой шкале значения асимметрии до 0,055 соответствуют условной норме состояния среды, а значения, превышающие 0,7, сигнализируют о критическом состоянии среды [7]. Нами предложен способ оценки качества условий роста растений, основанный на измерении асимметрии площади половинок листовых пластин древесных растений. Как уже упоминалось, листовые пластины исследуемых видов обладают билатеральной симметрией, которая, являясь формой согласованности частей живых организмов, имеет важное общебиологическое значение.

В условиях городской среды техногенные факторы оказывают негативное воздействие на древесные растения, вызывая у них нарушения симметрии листовых пластин, что проявляется в виде флуктуирующей асимметрии – небольших случайных отклонений от билатеральной симметрии [17].

Предлагаемый авторский подход к определению типа условий произрастания растений, то есть к оценке качества окружающей среды, основан на измерении асимметричности площади половинок листовых пластин деревьев. Данный метод, подобно подходу В. М. Захарова, исходит из принципа подобия частей тела у билатерально-симметричных организмов, где отношение площадей подобных фигур равняется квадрату коэффициента подобия.

Показатель асимметрии листовой пластины служит аналогом коэффициента подобия и вычисляется как квадратный корень из отношения площадей половинок листа. Расчет коэффициента асимметрии листа по пяти параметрам (согласно методике В. М. Захарова) предполагает установление однозначного соответствия между пятью парами точек на листе. Наш метод является эквивалентным методу пяти параметров, так как оба они базируются на геометрическом подобии и позволяют переходить от одних измерений к другим.

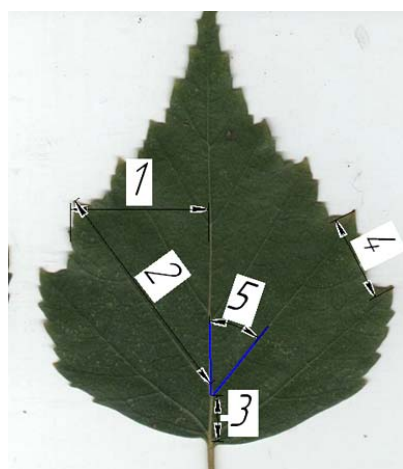


а

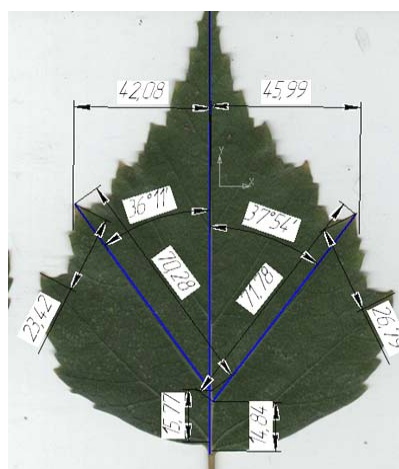


б

Рис. 1. Типы побегов (а) и пример выборки листовых пластин (б) березы повислой



а



б

Рис. 2. Параметры (а) и примеры измерения (б) листовых пластин березы повислой

Для повышения точности и достоверности результатов измерение площади половинок листа проводилось с точностью до 1 мм^2 с использованием специализированной программы LeafProg «Анализ листовой пластины древесных растений» (рис. 3), разработанной на кафедре лесного инжиниринга СибГУ им. М. Ф. Решетнева (свидетельство о гос. регистрации № 2009614523), авторами которой являются Е. В. Авдеева и А. А. Карпов. В процессе исследования листовые пластины разделялись на левую и правую половины, и для каждой из них программа LeafProg определяла площадь.

Степень неравномерности листовой пластины, измеряемая по соотношению площадей ее частей (рис. 3), рассчитывается как квадратный корень из отношения меньшей половины листа к большей. Для всей исследуемой группы асимметрия листовых пластин вычислялась как среднее значение. В заключение выполняется сопоставительный анализ изменения показателей

асимметрии листовых пластин, полученных с использованием двух различных подходов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование изменчивости характеристик ассимиляционного аппарата березы повислой в ответ на воздействие в условиях городской среды Красноярска проводилось на деревьях, подвергшихся различной техногенной нагрузке. Листья собирались в 9 городских скверах и на контрольном участке вблизи Плодово-ягодной станции, что дало возможность достоверно оценить воздействие аэротехногенных факторов и реакцию растений на них. Представленные в табл. 1 и 2 данные демонстрируют, что загрязнение окружающей среды оказывает влияние на асимметрию листовых пластин березы повислой, увеличивая ее величину с ростом техногенной нагрузки.

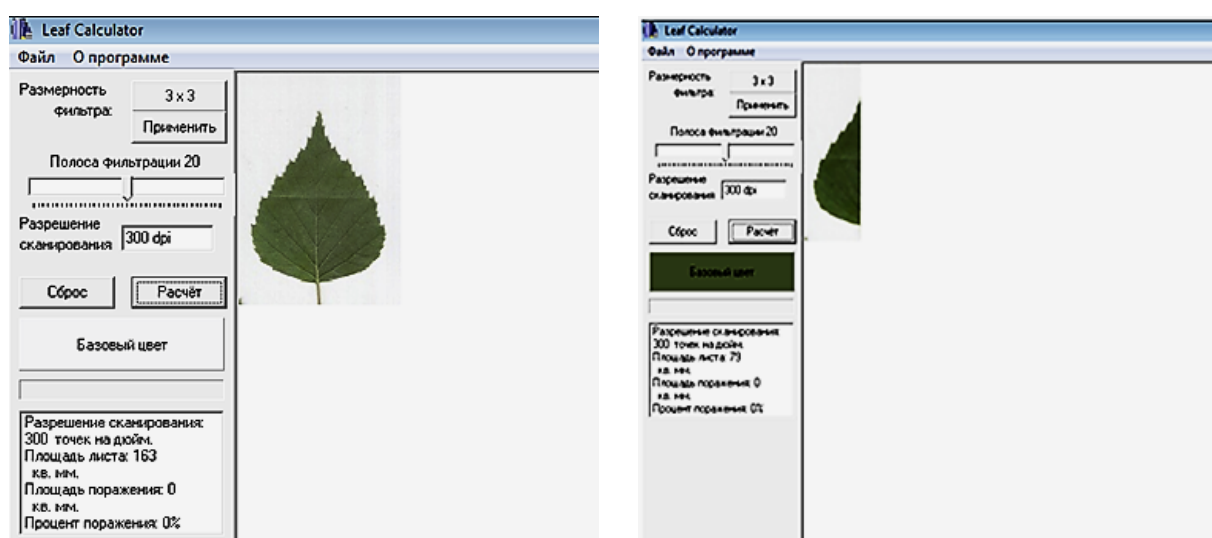


Рис. 3. Определение площади листовых пластин в программе LeafProg на примере листа березы повислой

Таблица 1

Расчетные значения асимметрии по пяти параметрам листа и величине асимметрии по площади половинок листа березы повислой

№ и «адрес» пункта наблюдения	Наименование сквера (место сбора листьев: центр сквера, периферия сквера)	Показатель асимметрии по площади половинок листовой пластины	Коэффициент асимметрии по пяти параметрам листа	Техногенные воздействия ИЗА ₄ , в долях ПДК
№ 1, Минусинская, 14д	«Плодово-ягодная станция»	3,036	0,05	12,0
	«Лесок» (центр)	3,143	0,052	
№ 21, ул. Красно-московская, 32д	«Серебряный» (центр)	3,254	0,059	13,8
	«Серебряный» (периф.)	3,273	0,06	
№ 5, Быковского, 4д	«Космонавтов» (центр)	3,173	0,058	13,9
	«Космонавтов» (периф.)	3,211	0,059	
№ 7, Матросова, 6д	«Панюковский» (центр)	3,297	0,06	16,0
	«Панюковский» (периф.)	3,315	0,064	
№ 8, ул. Кутузова, 92ж	«Сказочный» (центр)	3,347	0,064	16,4
№ 20, ул. 26 Бакинских комиссаров, 26д	«Одесский» (центр)	3,578	0,073	22,6
№ 9 ул. Чайковского, 7д	«Энтузиастов» (центр)	3,329	0,061	16,2
	«Энтузиастов» (периф.)	3,373	0,063	
	«Юбилейный» (центр)	3,376	0,064	
	«Юбилейный» (периф.)	3,394	0,069	
№ 3, ул. Сурикова, 54	«им. В.И. Сурикова» (центр)	3,657	0,076	25,5

Таблица 2
Статистически параметры исследуемых выборок березы повислой

№ и «адрес» пункта наблюдения	Наименование объекта	Объём выборки	$\bar{X}$	$\pm m$	$\pm \sigma$	V, %	Уровень изменчивости	P, %
Величина коэффициента асимметрии по пяти параметрам								
№ 1, ул. Минусинская, 14д	Плодово-ягодная станция	50	0,050	0,002	0,017	34,165	большой	4,832
	«Лесок»	50	0,052	0,004	0,031	50,412	большой	7,129
№ 21, ул. Красно- московская, 32д	«Серебряный»	100	0,060	0,003	0,028	47,385	большой	4,739
№ 5, ул. Быковского, 4д	«Космонавтов»	100	0,060	0,003	0,031	52,013	очень боль- шой	5,201
№ 7 ул. Матросова, 6д	«Панюковский»	100	0,062	0,004	0,038	61,916	очень боль- шой	6,192
№ 8, ул. Кутузова, 92ж	«Сказочный»	50	0,064	0,003	0,018	28,265	большой	3,997
№ 9 ул. Чайковского, 7д	«Энтузиастов»	100	0,062	0,004	0,042	67,388	очень боль- шой	6,739
	«Юбилейный»	100	0,060	0,005	0,048	72,708	очень боль- шой	7,271
№ 20, ул. 26 Бакинских комиссаров, 26д	«Одесский»	50	0,073	0,005	0,032	44,053	большой	6,230
№ 3 ул. Сурикова, 54	им. В. И. Сурикова	100	0,075	0,003	0,034	47,068	большой	4,707
Показатель асимметричности по площади половинок листа								
№ 1, ул. Минусинская, 14д	Плодово-ягодная станция	50	9,220	0,751	5,309	62,752	очень боль- шой	8,874
	«Лесок»	50	9,880	0,490	4,901	44,636	большой	4,464
№ 21, ул. Красно- московская, 32д	«Серебряный»	100	10,65	0,755	7,552	70,810	очень боль- шой	7,081
№ 5, ул. Быковского, 4д	«Космонавтов»	100	10,19	0,568	5,681	55,748	очень боль- шой	5,575
№ 7 ул. Матросова, 6д	«Панюковский»	100	10,93	0,719	7,189	68,729	очень боль- шой	6,873
№ 8, ул. Кутузова, 92ж	«Сказочный»	50	11,20	0,370	2,616	23,359	большой	3,303
№ 9 ул. Чайковского, 7д	«Энтузиастов»	100	11,23	0,605	6,053	53,877	очень боль- шой	5,388
	«Юбилейный»	100	11,46	0,770	7,703	64,191	очень боль- шой	6,419
№ 20, ул. 26 Бакинских комиссаров, 26д	«Одесский»	50	12,80	1,112	7,863	61,427	очень боль- шой	8,687
№ 3 ул. Сурикова, 54	им. В. И. Сурикова	100	13,38	0,811	8,111	60,150	очень боль- шой	6,015

Для определения статистической значимости расхождений в коэффициентах асимметрии, вычисленных на основе пяти морфологических характеристик листовых пластинок и показателя асимметрии, основанного на площади половинок листа, был выполнен анализ растений, произрастающих в центральной и периферийной частях сквера.

Результаты статистического анализа выявили отсутствие значимых различий между значениями, полученными для растений в центре и на периферии сквера. Критерий Стьюдента (t-критерий) показал, что эмпирическое значение t-статистики ($t_{\text{ф}}$) меньше табличного значения ($t_{\text{табл}}$). При уровне значимости $p = 0,01$ и числе степеней свободы $v = 98$, табличное значение t-критерия составляет 2,63 (согласно табл. 3 и 4), что свидетельствует об отсутствии статистически значимых различий.

В связи с существующей планировкой скверов, ни плотность зеленых насаждений по краям, ни размеры зон озеленения не позволяют снизить воздействие аэротехногенных факторов, что негативно сказывается

на состоянии листовых пластин березы повислой.

Необходимо отметить, что тенденция изменения асимметрии листовых пластинок прослеживается как при анализе коэффициентов, рассчитанных на основе пяти морфометрических параметров, так и при оценке асимметрии, определяемой по площади полулистьев. Данный факт подтверждается исследованиями, аналогичными проведенным в области биоиндикации.

Результаты проведенного исследования показали, что минимальные отклонения в развитии ассимиляционного аппарата растений наблюдаются на контрольном участке, расположенном вблизи Плодово-ягодной станции, а также в сквере «Лесок», где уровень загрязнения атмосферного воздуха относительно низок. Значения коэффициента асимметрии, рассчитанные по пяти параметрам листовых пластинок, для растений, произрастающих на данных территориях, не превышают установленных допустимых пределов, что соответствует нормальным показателям развития.

Таблица 3

Оценка достоверности различий коэффициентов асимметрии по 5 параметрам листьев березы повислой для растений, произрастающих на периферии и в центре объекта

Расположение на объекте	Показатель асимметричности листовых пластин по площади листьев					m _{1,2}	t _ф
	n (количество листьев)	$\bar{X}$	±m	±σ	X ₁ –X ₂		
«Серебряный»							
в центре сквера	50	10,59	2,011	14,217			
на периферии	50	10,71	1,258	8,896			
					–0,150	2,396	–0,063
«Космонавтов»							
в центре сквера	50	10,07	0,767	5,423			
на периферии	50	10,31	0,840	5,939			
					–0,240	1,149	–0,209
«Панюковский»							
в центре сквера	50	10,87	0,900	6,364			
на периферии	50	10,99	1,133	8,014			
					–0,040	1,462	–0,027
«Энтузиастов»							
в центре сквера	50	11,08	0,704	4,975			
на периферии	50	11,38	1,008	7,131			
					–0,310	1,242	–0,250
«Юбилейный»							
в центре сквера	50	11,4	0,934	6,607			
на периферии	50	11,52	1,244	8,798			
					–0,480	1,572	–0,305

Таблица 4

Оценка достоверности различий показателя асимметричности по площади листьев березы повислой для растений, произрастающих на периферии и в центре объекта

Расположение на объекте	Показатель асимметричности листовых пластин по площади листьев					m _{1,2}	t _φ
	n (количество листьев)	$\bar{X}$	±m	±σ	X ₁ –X ₂		
«Серебряный»							
в центре сквера	50	10,59	2,011	14,217			
на периферии	50	10,71	1,258	8,896			
					–0,150	2,396	–0,063
«Космонавтов»							
в центре сквера	50	10,07	0,767	5,423			
на периферии	50	10,31	0,840	5,939			
					–0,240	1,149	–0,209
«Панюковский»							
в центре сквера	50	10,87	0,900	6,364			
на периферии	50	10,99	1,133	8,014			
					–0,040	1,462	–0,027
«Энтузиастов»							
в центре сквера	50	11,08	0,704	4,975			
на периферии	50	11,38	1,008	7,131			
					–0,310	1,242	–0,250
«Юбилейный»							
в центре сквера	50	11,4	0,934	6,607			
на периферии	50	11,52	1,244	8,798			
					–0,480	1,572	–0,305

Значения показателей асимметрии листовых пластинок березы повислой, произрастающей в скверах «Серебряный» и «Космонавтов», колеблются в пределах от 3,17 до 3,27, что свидетельствует о наличии стрессовых факторов окружающей среды и начальной стадии отклонения от нормального развития. В скверах «Энтузиастов», «Сказочный», «Юбилейный» и «Панюковский» показатели асимметрии листовых пластинок варьируются от 3,29 до 3,39, что соответствует умеренному уровню отклонения от нормы и ха-

рактеризует условия произрастания как не вполне благоприятные.

Наибольшая потеря устойчивости развития растений наблюдалась в пробах, взятых в скверах «Одесский» и «им. В. И. Сурикова». Здесь параметры асимметрии листовых пластинок достигали значений 3,58 и более, что указывает на критическое состояние окружающей среды. Важно подчеркнуть, что эта закономерность прослеживается при анализе асимметрии листьев обоими использованными способами (см. табл. 2).

Изучение одного и того же явления – флуктуирующей асимметрии листовых пластин – с помощью двух различных методик, дало возможность установить степень изменения асимметрии листьев березы повислой, произрастающей в различных районах Красноярск. Полученные данные были сопоставлены с уровнем техногенного воздействия, основываясь на информации со стационарных постов мониторинга.

На рис. 4 изображена зависимость между асимметрией листовых пластинок и интенсивностью техногенного загрязнения в городской среде. Данная зависимость представлена для двух равнозначных методик, при этом единицы измерения унифицированы.

В заключение, оба метода исследования, а именно метод В. М. Захарова и авторская разработка, позволяют описать процесс изменения асимметрии листовых пластин. Кроме того, они отражают тенденцию изменения этого процесса в условиях города в зависимости от степени загрязнения атмосферного воздуха.

Коэффициенты и параметры уравнения представлены в табл. 5.

Значения коэффициента детерминации R^2 находятся в диапазоне от 0,9488 до 0,9525, а значение критерия Фишера значительно выше табличного, что свидетельствует об адекватности выбранной модели для описания исследуемого процесса. Полученное уравнение множе-

ственной регрессии демонстрирует статистическую значимость. Определение границ различных типов условий произрастания растений выполняется по уравнению Y_2 , используя значения x , соответствующие границам уровней качества среды, согласно методике В. М. Захарова.

В табл. 6 отображены точки, где линии тренда пересекают условные границы, определяющие качество среды (по методике В. М. Захарова) и характеризующие типы условий произрастания растений (согласно предложенной методике).

Изменение асимметрии листовых пластин, зависящее от концентрации ИЗА4 (в долях ПДК для человека), характеризуется следующими показателями: Y_1 – асимметричность площади листовых половинок; Y_2 – коэффициент асимметрии по пяти параметрам листа; x – ИЗА4 (в долях ПДК).

Результаты проведенных исследований указывают на то, что береза повислая весьма чувствительна к воздействию городской среды, а коэффициенты асимметрии листовых пластин служат индикатором ее состояния и условий произрастания.

На основе полученных данных (рис. 4) и в соответствии с методикой В. М. Захарова, создана шкала для оценки условий произрастания растений, основанная на показателе асимметричности площади листовых пластин (табл. 7).

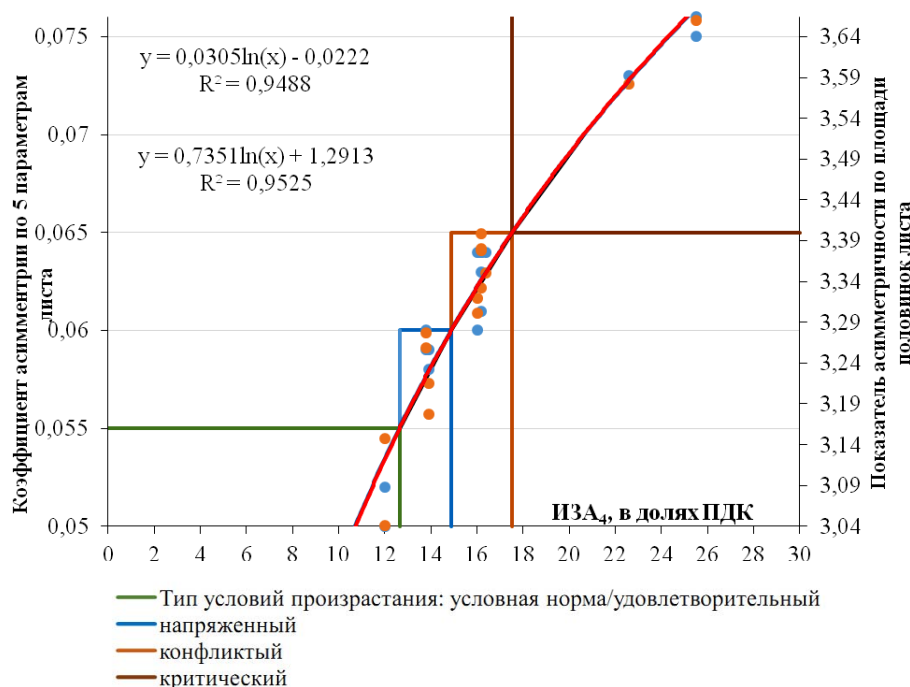


Рис. 4. Изменчивость асимметрии листовых пластин березы повислой от уровня техногенной нагрузки в условиях урбанизированной среды двумя эквивалентными методами исследования

Таблица 5
Коэффициенты уравнений и критерии адекватности модели

Процесс изменчивости асимметрии листовых пластин в зависимости от уровня загрязнения атмосферного воздуха (ИЗА4), в долях ПДК для человека, выраженный через:	a	b	R^2	F – критерий Фишера
Y_1 – коэффициент асимметрии по 5 параметрам листа	0,0305	–0,0222	0,9488	222,38
Y_2 – показатель асимметричности по площади половинок листовых пластин	0,7351	1,2913	0,9525	240,63

Примечание. R^2 – коэффициент детерминации; F – критерий Фишера.

Таблица 6
Границы уровней качества урбосреды

X – точки пересечения линий тренда с условными границами уровней качества среды		
Y ₁	x	Y ₂
0,055	12,56792	3,15195
0,06	14,80673	3,27245
0,065	17,44436	3,39296

Таблица 7
Оценка качества среды по показателям асимметрии листьев березы повислой (на примере г. Красноярск)

Коэффициент асимметрии по 5 параметрам листа [по методике В. М. Захарова]	Показатель асимметричности по площади половинок листа [по методике авторов]	Границы качества среды – ИЗА ₄ , в долях ПДК для человека	Тип условий произрастания растений [по методике авторов]	Оценка качества среды [по методике В. М. Захарова]
до 0,055	до 3,15	до 12,64	удовлетворительный	условно нормальное
0,056–0,06	3,16–3,27	12,65–14,89	напряженный	начальные отклонения от нормы
0,061–0,065	3,28–12,39	14,90–17,53	конфликтный	средний уровень отклонений от нормы
более 0,066	более 3,40	более 17,54	критический	существенный уровень отклонений от нормы/ критическое состояние

ВЫВОДЫ

Анализ условий произрастания показал, что на всех уровнях организации живых существ наблюдается реакция организмов на воздействие техногенных факторов городской среды. Изучение стабильности развития ассимиляционного аппарата исследуемых видов в условиях города позволяет сделать следующие выводы.

Наблюдается тенденция снижения стабильности развития, прямо пропорциональная увеличению техногенной нагрузки. Берёза повислая – наиболее чувствительна к техногенным условиям. Применяемые методы исследования достоверно отражают полученные зависимости.

Математическая модель, представляющая собой функцию взаимосвязи асимметрии листовых пластинок и уровня загрязнения воздуха, является инструментом прогнозирования. Уровень загрязнения воздуха (ИЗА₄, в долях ПДК) определяет тип условий произрастания растительности, что проявляется в изменчивости показателей асимметрии ассимиляционного аппарата. Показатели изменчивости листовых пластин отражают уровень загрязнения и, следовательно, предопределяют тип условий произрастания. В результате, полученные данные позволяют прогнозировать рост и развитие березы повислой на определенной территории, что позволяет принимать обоснованные решения по формированию структуры насаждений и выбору мероприятий по уходу.

Комбинирование коэффициентов и параметров асимметрии, рассчитанных различными методами, позволило разработать шкалу оценки качества среды и типа условий произрастания на основе асимметрии площади листовых пластин. Разработанная и апробированная методика биоиндикации, основанная на анализе асимметрии листовых пластин по соотношению площадей их половинок, адекватно отражает проис-

ходящие процессы и может быть рекомендована для экспресс-оценки качества городской среды в экологическом мониторинге. Применение данной методики и специального программного обеспечения значительно повышает точность результатов, сокращает сроки и стоимость исследований.

Проведённые исследования дают возможность судить о степени загрязнённости окружающей среды, анализируя асимметрию её листьев, а применение метода, основанного на оценке асимметрии площади листовых половинок, существенно ускоряет процесс и увеличивает точность получаемых данных. Этот вид подходит для использования в качестве индикатора, поскольку он надёжно определяет четыре типа мест произрастания, которые характеризуют состояние окружающей среды под воздействием человеческой деятельности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Авдеева Е. В. Зеленые насаждения в мониторинге окружающей среды крупного промышленного города: (на примере г. Красноярск) : автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Красноярск, 2008. 30 с.
2. Авдеева Е. В. Зеленые насаждения в мониторинге окружающей среды крупного промышленного города: на примере г. Красноярск : монография. Красноярск : СибГТУ, 2008. 219 с.
3. Авдеева Е. В., Надемянов В. Ф. Оценка стабильности развития березы повислой (*Betula pendula*) в скверах г. Красноярск // Технологии и оборудование садово-паркового и ландшафтного строительства. Красноярск : СибГТУ, 2013. С. 11–14.
4. Авдеева Е. В., Кухар И. В. Роль скверов в развитии системы озеленения города Красноярск // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений : материалы XXI Международной научной конференции. Красноярск, 2018. Т. 21. С. 117–120.

5. Артемьев О. С. Методы таксации городских насаждений : монография. Красноярск : СибГТУ, 2003. 100 с.

6. Ветчинникова Л. В. Береза: вопросы изменчивости (морфо-физиологические и биохимические аспекты). Москва : Наука, 2004. 183 с.

7. Захаров В. М., Яблоков А. В. Анализ морфологической изменчивости как метод оценки состояния природных популяций // Новые методы изучения почвенных животных в радиоэкологических исследованиях. Москва : Наука, 1985. С. 176–185.

8. Здоровье среды: практика оценки / В. М. Захаров, А. Т. Чубинишвили, С. Г. Дмитриев [и др.]. Москва, 2000. 320 с.

9. Кухар И. В. Особенности роста березы повислой (*Betula pendula* Roth.) и липы мелколистной (*Liriodendron tulipifera* L.) в условиях урбанизированной среды (на примере скверов г. Красноярска) : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Красноярск, 2023. 21 с.

10. Нефедова Т. А. *Betula pendula* Roth. как объект экологического мониторинга городской среды : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Москва, 2003. 21 с.

11. Петункина Л. О., Сарсацкая А. С. Береза повислая, как индикатор городской среды // Вестник Кемеровского государственного университета, 2015. № 4 (64). Т. 3. С. 68–71.

12. Якубов Х. Г. Экологический мониторинг зеленых насаждений Москвы. Москва : ООО «Стагирит-Н», 2005. 264 с.

13. Avdeeva E., Kuhar I., Chernikova K. The Current State of the Landscaping System of a Large Industrial Center (for Example, the City of Krasnoyarsk). Published under licence by IOP Publishing Ltd. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1079, Chapter 3. 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1079 042048. Doi:10.1088/1757-899X/1079/4/042048.

14. Jäger E. Möglichkeiten der Prognose synanthroper Pflanzenausbreitungen. Flora 180: 1988. Pp. 101–131. DOI: 10.1016/S0367-2530(17)30302-X.

15. Kozlov M. V., Wisley B. J., Koricheva J., Haukioja E. Fluctuating symmetry of birch leaves increases under pollution impact // Journal of Applied Ecology, 1996. Vol. 33. Pp. 1489–1495.

16. Palmer A. R. Waltzing with asymmetry // Bioscience. 1996, 46. Pp. 518–532. Doi: 10.2307/1312930.

17. Van Valen L. A study of fluctuating asymmetry // Evolution, 1962. Vol. 16, no. 2. Pp. 125–142. URL: <http://dx.doi.org/10.2307/2406192>.

18. Kuhar I., Avdeeva E. Research and Analysis of the State and Development of Woody Plants in The Squares of the City of Krasnoyarsk Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 1079, Chapter 4. 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1079 052003. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/5/052003.

19. Епринцев С. А., Куролап С. А. Оценка природного каркаса крупных урбанизированных территорий Воронежской области как фактора экологической безопасности // Медико-экологическая диагностика состояния окружающей среды города Воронежа : сборник научных статей. Воронеж : Научная книга, 2017. С. 159–167.

20. Волкодаева М. В., Володина Я. А. О методах контроля состояния зеленых насаждений урбанизированных территорий // Системы контроля окружающей среды. 2023. № 4 (54). С. 65–70. DOI: 10.33075/2220-5861-2023-4-65-70.

21. Клепиков О. В., Самойлов А. С., Ушаков И. Б., Попов В. И., Куролап С. А. Комплексная оценка состояния окружающей среды промышленного города // Гигиена и санитария. 2018; 97(8): 686–692. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2018-97-8-686-692>.

22. Кухар И. В., Авдеева Е. В., Иванов Д. В., Черникова К. В. Дендроиндикация древесных растений в урбанизированной среде // Проблемы озеленения крупных городов : сборник материалов XXII научно-практического форума. Москва, 2023. С. 109–112.

23. Kukhar I. V., Ivanov D. V. To the question of inventory of landscape objects in Krasnoyarsk // Технологии и оборудование садово-паркового и ландшафтного строительства : сборник статей X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Красноярск, 2023. С. 84–97.

24. Аккумуляция техногенной пыли березняками разнотравными в зоне воздействия известняковых карьеров г. Красноярска / Л. Н. Скрипальщикова, В. В. Стасова, А. И. Татаринцев, М. А. Пляшечник // Вестник КрасГАУ. 2012. № 10(73). С. 96–100.

25. Безруких В. А., Авдеева Е. В., Селенина Е. А. Обоснование видового состава древесных растений с учетом дендроклиматического районирования территории Сибирского города и его пригородной зоны (на примере города Красноярска) // Хвойные бореальной зоны. 2020. Т. 38, № 5-6. С. 225–236.

26. Кухар И. В. Особенности роста березы повислой (*Betula pendula* Roth.) и липы мелколистной (*Liriodendron tulipifera* L.) в условиях урбанизированной среды (на примере скверов г. Красноярска) : дис. ... канд. с.-х. наук. Красноярск, 2023. 276 с.

REFERENCES

1. Avdeeva E. V. Zelenye nasazhdeniya v monitoringe okruzhayushey sredy krupnogo promyshlennogo goroda (na primere g. Krasnoyarska) : avtoref. dis. ... d-ra s.-h. nauk. Krasnoyarsk, 2008. 30 s.

2. Avdeeva E. V. Zelenye nasazhdeniya v monitoringe okruzhayushey sredy krupnogo promyshlennogo goroda: na primere g. Krasnoyarska : monografiya. Krasnoyarsk : SibGTU, 2008. 219 s.

3. Avdeeva E. V., Nademyanov V. F. Ocenka stabilnosti razvitiya berezy povisloy (*Betula pendula*) v skverah g. Krasnoyarska // Tehnologii i oborudovanie sadovoparkovogo i landshaftnogo stroitelstva. Krasnoyarsk : SibGTU, 2013. S. 11–14.

4. Avdeeva E. V., Kuhar I. V. Rol skverov v razvitiisistemy ozeleneniya goroda Krasnoyarska // Plodovodstvo, semenovodstvo, introdukciya drevesnyh rastenij : materialy XXI Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. Krasnoyarsk, 2018. T. 21. S. 117–120.

5. Artemev O. S. Metody taksacii gorodskih nasazhdenij : monografiya. Krasnoyarsk : SibGTU, 2003. 100 s.

6. Vetchinnikova L. B. Bereza: voprosy izmenchivosti (morfo-fiziologicheskie i biokhimicheskie aspekty). Moskva : Nauka, 2004. 183 s.

7. Zaharov V. M., Yablokov A. V. Analiz morfologicheskoy izmenchivosti kak metod ocenki sostoyaniya prirodnih populyacij // *Novye metody izucheniya pochvennyh zhivotnyh v radioekologicheskikh issledovaniyakh*. Moskva : Nauka, 1985. S. 176–185.
8. Zdorove sredi: praktika ocenki / V. M. Zaharov, A. T. Chubinishvili, S. G. Dmitriev [i dr.]. Moskva, 2000. 320 s.
9. Kuhar I. V. Osobennosti rosta berezy povisloy (betula pendula roth.) i lipy melkolistnoj (tilia cordata mill.) v usloviyah urbanizirovannoy sredi (na primere skverov g. Krasnoyarska) : avtoref. dis. ... kand. s.h. nauk. Krasnoyarsk, 2023. 21 s.
10. Nefedova T. A. Betula pendula Roth. kak obekt ekologicheskogo monitoringa gorodskoj sredi : avtoref. dis. ...kand. biol. nauk. Moskva, 2003. 21 s.
11. Petunkina L. O., Sarsackaya A. S. Bereza povislaya, kak indikator gorodskoj sredi // *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015. № 4 (64). T. 3. S. 68–71.
12. Yakubov H. G. Ekologicheskij monitoring zelenyh nasazhdenij Moskvy. Moskva : OOO «StagiritN», 2005. 264 s.
13. Avdeeva E., Kuhar I., Chernikova K. The Current State of the Landscaping System of a Large Industrial Center (for Example, the City of Krasnoyarsk). Published under licence by IOP Publishing Ltd. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 1079, Chapter 3. 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1079 042048. Doi:10.1088/1757-899X/1079/4/042048.
14. Jager E. Moglichkeiten der Prognose synanthroper Pflanzenausbreitungen. *Flora* 180: 1988. Rr. 101–131. DOI: 10.1016/S0367-2530(17)30302-X.
15. Kozlov M. V., Wisley B. J., Koricheva J., Haukioja E. Fluctuating symmetry of birch leaves increases under pollution impact // *Journal of Applied Ecology*, 1996. Vol. 33. Rr. 1489–1495.
16. Palmer A. R. Waltzing with asymmetry // *Bioscience*. 1996, 46. Rr. 518–532. Doi: 10.2307/1312930.
17. Van Valen L. A study of fluctuating asymmetry // *Evolution*, 1962. Vol. 16, no. 2. Rr. 125–142. URL: <http://dx.doi.org/10.2307/2406192>.
18. Kuhar I., Avdeeva E. Research and Analysis of the State and Development of Woody Plants in The Squares of the City of Krasnoyarsk Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 1079, Chapter 4. 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1079 052003. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/5/052003.
19. Eprincev S. A., Kurolap S. A. Ocenka prirodnogo karkasa krupnyh urbanizirovannyh territorij Voronezhskoj oblasti kak faktora ekologicheskoy bezopasnosti // *Mediko-ekologicheskaya diagnostika sostoyaniya okruzhayushej sredi goroda Voronezha : sbornik nauchnyh statej*. Voronezh : Nauchnaya kniga, 2017. S. 159–167.
20. Volkodaeva M. V., Volodina Ya. A. O metodah kontrolya sostoyaniya zelenyh nasazhdenij urbanizirovannyh territorij // *Sistemy kontrolya okruzhayushej sredi*. 2023. № 4 (54). S. 65–70. DOI: 10.33075/2220-5861-2023-4-65-70.
21. Klepikov O. V., Samojlov A. S., Ushakov I. B., Popov V. I., Kurolap S. A. Kompleksnaya ocenka sostoyaniya okruzhayushej sredi promyshlennogo goroda // *Gigiena i sanitariya*. 2018; 97(8): 686–692. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2018-97-8-686-692>.
22. Kuhar I. V., Avdeeva E. V., Ivanov D. V., Chernikova K. V. Dendroindikaciya drevesnyh rastenij v urbanizirovannoy srede // *Problemy ozeleneniya krupnyh gorodov : sbornik materialov XXII nauchnoprakticheskogo foruma*. Moskva, 2023. S. 109–112.
23. Kukhar I. V., Ivanov D. V. To the question of inventory of landscape objects in Krasnoyarsk // *Tehnologii i oborudovanie sadovo-parkovogo i landshaftnogo stroitelstva : sbornik statej X Vserossijskoj nauchnoprakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem*. Krasnoyarsk, 2023. S. 84–97.
24. Akkumulyaciya tehnogennoj pyli bereznyakami raznotravnyimi v zone vozdejstviya izvestnyakovyh karerov g. Krasnoyarska / L. N. Skripalshikova, V. V. Stasova, A. I. Tatarincev, M. A. Plyashechnik // *Vestnik KrasGAU*. 2012. № 10(73). S. 96–100.
25. Bezrukih V. A. Avdeeva E. V., Selenina E. A. Obosnovanie vidovogo sostava drevesnyh rastenij s uchetom dendroklimaticheskogo rajonirovaniya territorii Sibirskogo goroda i ego prigorodnoj zony (na primere goroda Krasnoyarska) // *Hvojnye borealnoj zony*. 2020. T. 38, № 5-6. S. 225–236.
26. Kuhar I. V. Osobennosti rosta berezy povisloy (betula pendula roth.) i lipy melkolistnoj (tilia cordata mill.) v usloviyah urbanizirovannoy sredi (na primere skverov g. Krasnoyarska) : dis. ... kand. s.-h. nauk. Krasnoyarsk, 2023. 276 s.

© Авдеева Е. В., Кухар И. В., 2025

Поступила в редакцию 02.06.2025
Принята к печати 04.08.2025

ТЕХНОЛОГИЯ ЗАГОТОВКИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

УДК 630*847.5

DOI: 10.53374/1993-0135-2025-4-50-55

Хвойные бореальной зоны. 2025. Т. XLIII, № 4. С. 50–55

ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ИНФРАКРАСНО-ВАКУУМНОЙ СУШИЛКЕ*

В. Н. Левинский, Е. Н. Епишков

Южно-Уральский государственный аграрный университет
Российская Федерация, 457103, Челябинская область, г. Троицк, ул. им. Ю. А. Гагарина, 13
E-mail: lv_74rus@mail.ru

Аннотация. В статье приводится краткое описание решенных на сегодняшний день задач по согласованию спектральных характеристик пород древесины с оптическими свойствами генератора ИК-излучения, а также о теоретическом описании процесса инфракрасной сушки пиломатериала в условиях вакуумной камеры, на основе чего были произведены расчеты, проектирование и изготовление инфракрасно-вакуумной сушильной установки. Приводится описание технологии процесса сушки пиломатериалов в разработанной установке. Отмечается, что процесс сушки является мультифизическим (теплообмен излучением, конденсация влаги, степень разряжения, форм-факторное влияние и т. д.), поэтому для установления взаимосвязей на разработанной установке планируется проведение многофакторного эксперимента по отработке режимов для одной породы древесины с последующей их корректировке на другие породы. Для сокращения числа натуральных опытов на сегодняшний день существуют программные продукты математического моделирования позволяющие проводить исследования мультифизических процессов в сложных конструкциях, к которым в том числе относится разработанная установка. Целью исследования является в проверка адекватности математической модели процесса сушки пиломатериалов в инфракрасно-вакуумной сушильной установке. Проведен натуральный эксперимент по сушки досок древесины, для которых в течении всего процесса сушки получены температурные данные для разных точек внутри вакуумной камеры и снаружи. Далее в программном продукте математического моделирования была воспроизведена метрическая модель, учитывающая детали конструкции установки, технологического оборудования и особенности форм-факторного размещения пиломатериала. И для данной метрической модели произведены расчеты поля температур в зоне сушки пиломатериала. При сравнении полученных данных эксперимента и с применением программного продукта прослеживается идентичность параметров температуры пленочных электронагревателей, а также доказана температурная разница между нижним и верхним рядом уложенных досок. Откуда следует вывод об адекватности математической модели распределения температуры в инфракрасно-вакуумной сушилке.

Ключевые слова: математическая модель, сушилка, инфракрасный, вакуумный.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 4, P. 50–55

ASSESSMENT OF THE ADEQUACY OF A MATHEMATICAL MODEL OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN AN INFRARED VACUUM DRYER**

V. N. Levinsky, E. N. Epishkov

South Ural State Agrarian University
13, Gagarin St., Troitsk, Chelyabinsk Oblast, 457103, Russian Federation
E-mail: lv_74rus@mail.ru

Annotation. The article provides a brief description of the tasks solved to date to coordinate the spectral characteristics of wood species with the optical properties of an IR radiation generator, as well as a theoretical description of the process of infrared drying of lumber in a vacuum chamber, on the basis of which calculations, design

* **Благодарности (финансирование).** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-01090, <https://rscf.ru/project/23-76-01090/>.

** **Acknowledgements.** The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 23-76-01090, <https://rscf.ru/project/23-76-01090/>.

and manufacture of an infrared vacuum drying unit were performed. The technology of the lumber drying process in the developed installation is described. It is noted that the drying process is multiphysical (heat exchange by radiation, condensation of moisture, degree of dilution, form factor effect, etc.), therefore, in order to establish relationships at the developed installation, it is planned to conduct a multifactorial experiment to work out the modes for one type of wood and then adjust them to other species. To reduce the number of natural experiments, there are currently mathematical modeling software products that allow conducting research on multiphysical processes in complex structures, including the developed installation. The purpose of the study is to verify the adequacy of the mathematical model of the lumber drying process in an infrared vacuum drying unit. A natural experiment was conducted on drying wood planks, for which temperature data was obtained for different points inside and outside the vacuum chamber during the entire drying process. Further, a metric model was reproduced in the mathematical modeling software product, considering the details of the installation design, technological equipment, and features of the form factor placement of lumber. And for this metric model, calculations of the temperature field in the lumber drying zone were performed. When comparing the experimental data obtained and using the software product, the identity of the temperature parameters of the film electric heaters is traced, and the temperature difference between the lower and upper rows of stacked boards is proved. The conclusion is that the mathematical model of temperature distribution in an infrared vacuum dryer is correct.

Keywords: mathematical model, dryer, infrared, vacuum.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день получены спектральные характеристики наиболее распространенных для переработки пород древесины, в которых особый интерес представляют экстремумы в диапазоне 9,4–9,7 мкм, так как в нем поглощение излучения 100 % [1]. При этих данных селективную работу системы «излучатель-приемник» возможно организовать с применением гибкого пленочного электронагревателя, это следует из его технических характеристик и дополнительных исследований, в которых установлена зависимость температуры поверхности ИК-излучателя от температуры окружающего пространства и его удельной мощности [2]. Проведены теоретические изыскания температурного воздействия и электромагнитного поля на пиломатериал в условиях разряженной среды, а также особенности расчёта конструкции вакуумной камеры, подбора технологического оборудования и системы автоматического управления (САУ) [3–6].

На основе исследований упомянутых выше произведены расчеты, проектирование и изготовление инфракрасно-вакуумной сушильной установки (рис. 1, табл. 1).



Рис. 1. Инфракрасно-вакуумная сушильная установка

Предполагается, что процессы сушки пиломатериала (досок), уложенного в штабель с промежуточ-

ными кассетами (каркас из реек с закрепленными пленочными электронагревателями), будет происходить в условиях замкнутого пространства герметичной камеры в разряженной среде. Поэтому для расчета ее конструктивных параметров прежде всего рассматривалась теория: физических процессов теплообмена излучением между гибким пленочным электронагревателем и высушиваемым пиломатериалом; уровень разряжения внутри камеры в разных периодах сушки [4]; конденсация влаги на охлаждающей поверхности; переходные процессы (например, переход от атмосферного давления к разряженному или нагрев пиломатериала до заданной температуры) [3; 7].

В совокупности процесс мультифизический. Основные процессы происходят в замкнутом пространстве и их степень влияния друг на друга очевидна, но требует более глубокого изучения. Для установления взаимосвязей на разработанной установке планируется проведение экспериментов по отработке и корректировке режимов для одной породы древесины.

Параллельно этому с применением программным обеспечением будет разрабатываться математическая модель, учитывающая все возможные варианты изменения параметров разряженной среды и высушиваемого пиломатериала в камере. Математическое описание в виде системы дифференциальных и алгебраических уравнений будет определяться аналитически на основе законов физики и эмпирически на основе получаемых кинетических кривых сушки пиломатериалов [8; 9].

Цель исследования заключается в проверке адекватности математической модели процесса сушки пиломатериалов в инфракрасно-вакуумной сушильной установке.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

План экспериментов подразумевает, в том числе разный способ укладки пиломатериала между щитами с пленочными электронагревателями, изменённые габаритные размеры пиломатериалов. На рис. 2 показан вариант размещения 1 м³ досок толщиной 50 мм, шириной 150 мм и длиной 4 м.

Таблица 1

Технические характеристики инфракрасно-вакуумной сушильной установки

№ п/п	Наименование	Значение
1	Параметры питающей сети	380 В, 50 Гц
2	Установленная мощность установки (суммарная мощность пленочных электронагревателей, циркуляционного и вакуумного насосов, приборов КИПиА)	7 кВт
3	Габаритные размеры установки	4630×1820×1410 мм
4	Внутренний размер рабочей камеры	4550×1210×970 мм
	Габаритный размер щита с пленочными электронагревателями	1000×4000 мм
5	Наибольшая длина пиломатериала	4,2 м
	Объем загрузки пиломатериала	до 1 м ³
6	Максимально допустимая температура нагрева пленочного электронагревателя	до +95 °С
	Значения рабочего вакуума	–0,1...0 МПа
7	Рекомендованное давление в системе циркуляции охлаждающей жидкости	0,06...0,15 МПа

Используя справочные данные из проектной документации, разработанная в рамках реализации гранта РНФ (Соглашение № 23-76-01090) инфракрасно-вакуумной сушильной установки, разработана метрическая модель непосредственно на программном продукте.

Система уравнений, описывающих конвективное течение воздуха в зоне сушки, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 \rho(\nabla \cdot \nabla) \rightarrow_u &= \nabla[-P \rightarrow_I + \rightarrow_k \rightarrow_k + \rightarrow_F + \rho \rightarrow_g] \\
 \nabla(\rho \rightarrow_u) &= 0 \\
 \rightarrow_k &= (\mu + \mu_T) * (\nabla \rightarrow_u + (\nabla \rightarrow_u)^T) - \\
 &- \frac{2}{3}(\mu + \mu_T) * (\rho \rightarrow_u) - \frac{2}{3} * \rho * k * \rightarrow_I \\
 \rho(\nabla \cdot \nabla) \rightarrow_k &= \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla \rightarrow_k \right] + P_k - \rho * \varepsilon \\
 \rho(\nabla \cdot \nabla) \rightarrow_\varepsilon &= \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \rightarrow_\varepsilon \right] + \\
 &+ C_{\varepsilon 1} * \frac{\varepsilon}{k} * P_k - C_{\varepsilon 2} * \frac{\varepsilon^2}{k} * \rho, \quad \varepsilon = e * p \\
 \mu_T &= \rho * C_\mu * \frac{k^2}{\varepsilon} \\
 P_k &= \mu_T * \left[\nabla \rightarrow_u : \left(\nabla \rightarrow_u + (\nabla \rightarrow_u)^T \right) - \frac{2}{3} * (\nabla \rightarrow_u)^2 \right] - \\
 &- \frac{2}{3} * \rho * k * \nabla \rightarrow_u,
 \end{aligned} \quad (1)$$

где k – плотность турбулентной кинетической энергии; $\rightarrow_u$ – вектор скорости воздуха; ε – диссипация турбулентной кинетической энергии; g – ускорение свободного падения; F – плотность массовых сил; p – давление; P_k – скорость производства турбулентной энергии течением; $C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ – коэффициенты модели турбулентности;

$$\rightarrow_I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} -$$

единичный тензор; μ – коэффициент динамической вязкости; ∇ – оператор Набла.

Уравнение теплопередачи с учётом гравитационной конвекции в зоне сушки.

$$\begin{aligned}
 \rho * C_p * \nabla T + \nabla_q \rightarrow &= Q \\
 \rightarrow_q &= -\lambda * \nabla T,
 \end{aligned} \quad (2)$$

где C_p – теплоёмкость среды при постоянном давлении; λ – коэффициент теплопроводности среды; q – тепловой поток, обусловленный теплопроводностью; T – температура среды; Q – плотность мощности источников тепла.

Система уравнений, описывающая теплообмен излучением между непрозрачными поверхностями, подчинена закону Стефана–Больцмана:

$$q = \varepsilon_{\text{пр}} * \sigma * (T_1^4 - T_2^4), \quad (2)$$

где $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведённая степень черноты поверхностей участвующих в теплообмене; $\sigma = 5,67 * 10^{-8} \text{ (Вт*К}^4\text{)/м}^2$ – постоянная Стефана–Больцмана.

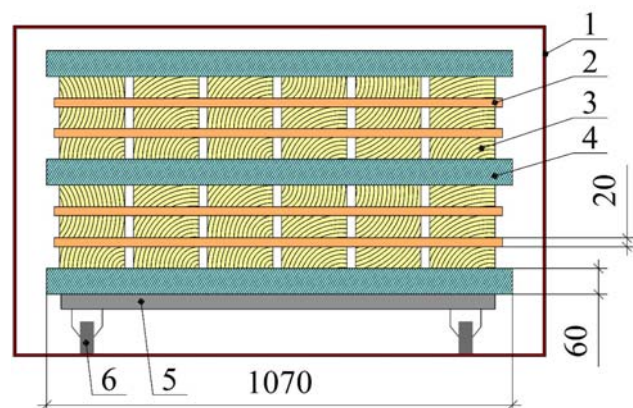


Рис. 2. Размещение досок в инфракрасно-вакуумной сушильной установке:

1 – корпус камеры; 2 – поперечные прокладки; 3 – доска; 4 – кассеты с пленочными электронагревателями (1, 2, 3 – порядок счета снизу вверх); 5 – подвижная платформа для укладки штабеля; 6 – колеса для выгрузки подвижной платформы из камеры

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для проведения эксперимента в сушильную установку была загружена партия досок сосны с габаритными параметрами и по принципу укладки, показанному на рис. 2. 50×100 мм и длиной 4 м. С применением разработанной САУ (с функцией записи параметров процесса в режиме реального времени) получены кривые сушки (рис. 3) [6]. Длительность процесса сушки составила 54 часа, доски были получены влажностью в разбросе 12–14 %. Затраты электрической энергии на сушку составили 88 кВт·ч. Управление процессом сушки осуществлялось по температуре доски. Температура устанавливалась на уровне 50 °С (гистерезис 1 °С). Разряжение в камере соответствовало уровню – 0,07 МПа.

Анализ эмпирических кривых показывает, что максимум температуры поверхности кассеты с пленочными электронагревателями № 3 соответствует 94,1 °С, кассеты № 2 нагрелась до 78,8 °С. Максимум температуры среды в камере соответствуют 35 °С и она коррелируется со значениями температуры в доске, которая соответствует заданному уровню управления процессом сушки, но разница между кривыми 3 и 4 (рис. 3) составляет 5–7 °С. Стоит отметить, что нижний ряд досок был холоднее на величину этой разницы. Температура воздуха в помещении, где установлена камера за весь процесс не превышала 16 °С.

Современные программные продукты математического моделирования (COMSOL Multiphysics,

MATLAB Simulink, SimInTech и др.), позволяют проводить исследования мультифизических процессов в сложных конструкциях, к которым в том числе относится разрабатываемая инфракрасно-вакуумная сушильная установка для древесины [10–14].

Используя справочные данные разработанной конструкторской документации и выбранного технологического оборудования, разработана геометрическая модель непосредственно в программе математического моделирования, для которой произведены расчеты поля температур в зоне сушки пиломатериала (рис. 4).

Расчёты выполнены при атмосферном давлении в камере 0,3 атм. и температуре наружного воздуха 15 °С. Плотность мощности нагревательного элемента составил 370 Вт/м² в режиме включение – 15 минут, 35 минут – пауза.

Для наглядной демонстрации распределения температуры в числовом формате, выделим направление (красная прямая рис. 5, а), вдоль которого исследуем изменение температуры и непосредственно распределение температуры вдоль данной прямой (рис. 5, б).

Анализ полученных зависимостей с применением программного продукта моделирования процесса сушки древесины показал, что температура поверхности 3-х пленочных электронагревателей составила 83,5; 82; и 94 °С; температура нижнего ряда досок до 29 °С, а верхнего до 44 °С.

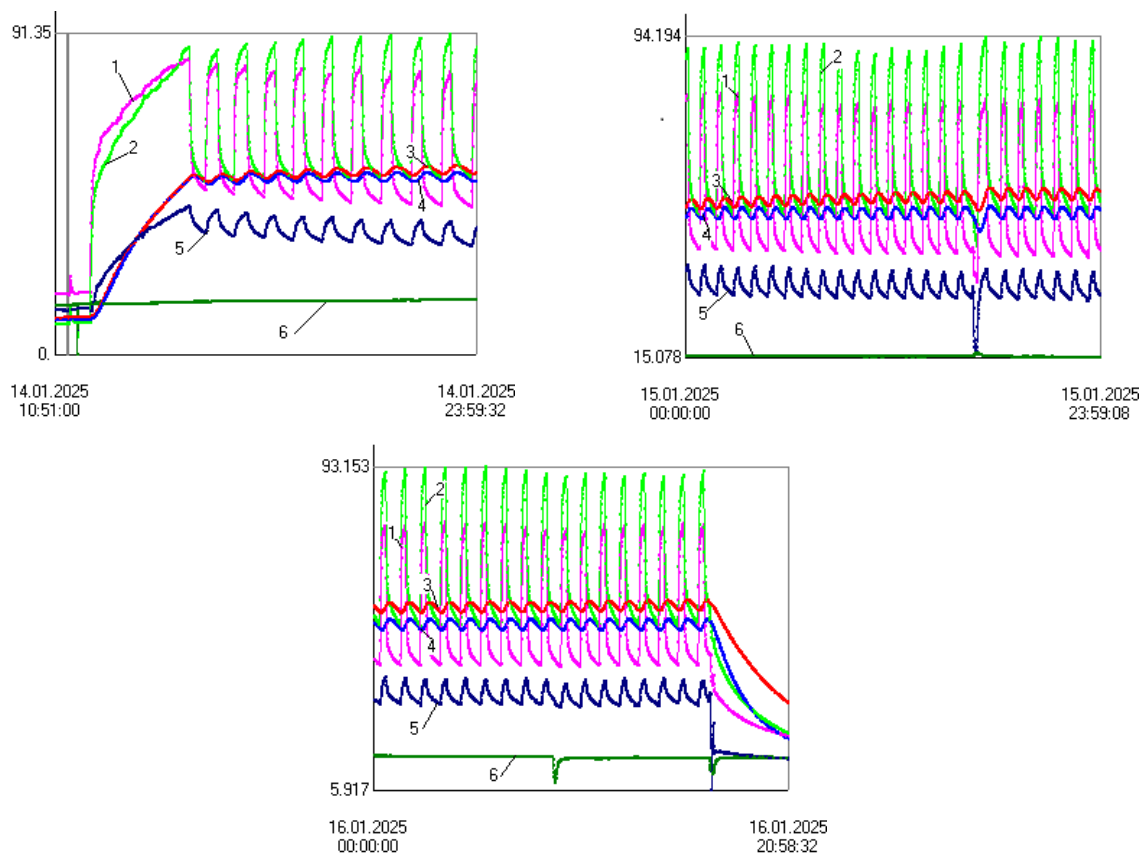


Рис. 3. Эмпирические кривые сушки сосновых досок:

1 – температура поверхности пленочного электронагревателя (кассеты № 3); 2 – температура поверхности пленочного электронагревателя (кассеты № 2); 3 – температура в доске (между кассетами № 2 и № 3); 4 – температура в доске (между кассетами № 1 и № 2); 5 – температура среды в камере; 6 – температура воздуха в помещении, где установлена камера

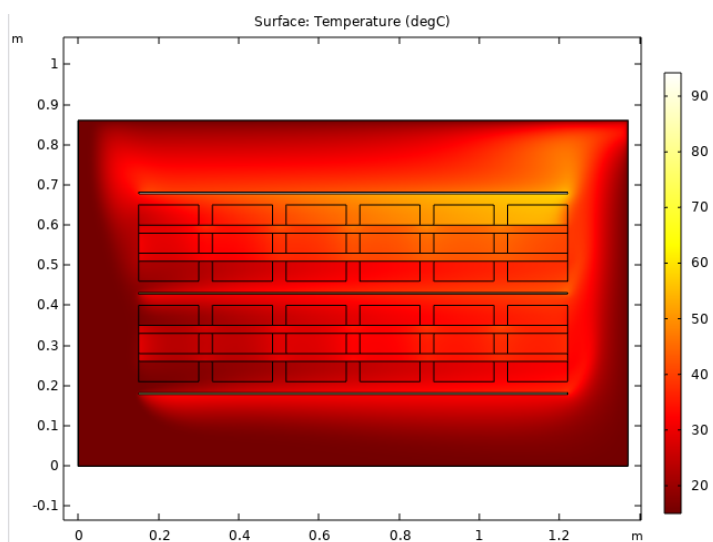


Рис. 4. Поле температур в зоне сушки пиломатериала

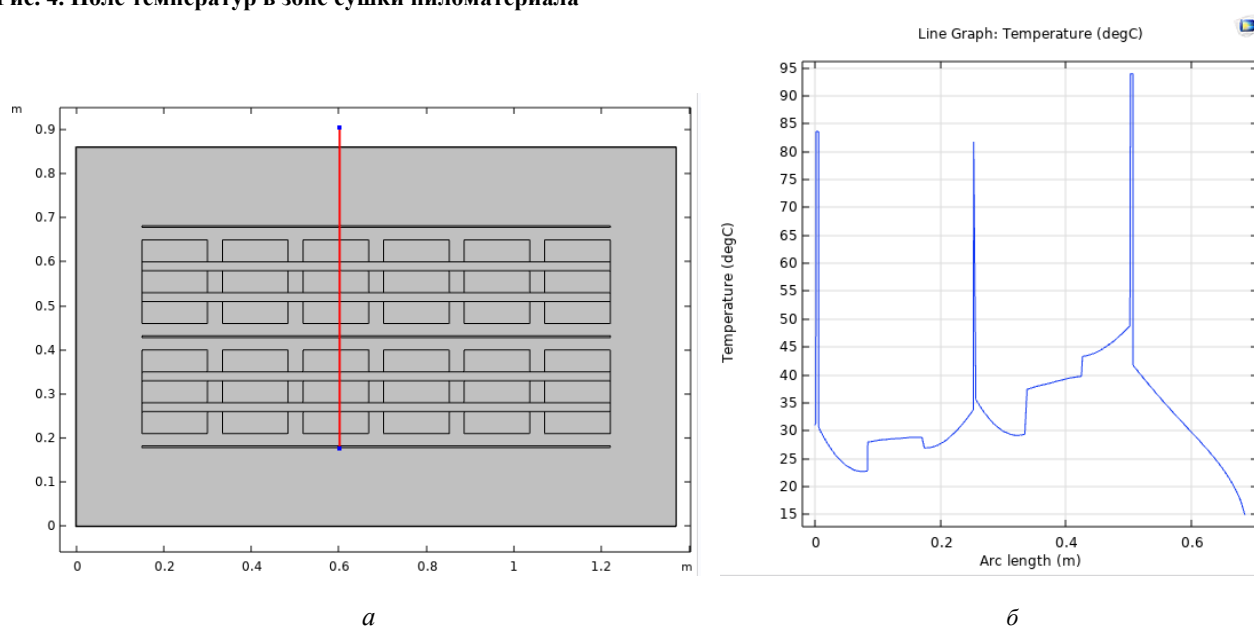


Рис. 5. Распределение температуры в числовом формате уложенного пиломатериала с кассетами пленочных в вакуумной камере:

a – прямая вдоль которой исследуется поле температур; b – распределение температуры вдоль выделенной прямой

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставляя данные эксперимента и данные полученные с применением программного продукта, следует вывод об адекватности математической модели распределения температуры в инфракрасно-вакуумной сушилке, так как прослеживается идентичность параметров температуры пленочных электронагревателей, а также доказана температурная разница между нижним и верхним рядом уложенных досок. Однако, требуется больше информации о скорости нагрева древесины и набор производственной статистики для уточнения и минимизации ошибки, так как реальный нагрев происходил скорее, чем при теоретическом моделировании.

Полученная модель позволит провести ряд виртуальных испытаний, по которым можно исследовать различные режимы работы элементов сушильной установки и объекта сушки, оптимизировать алгоритмы

управления и в последующем создавать из полученных алгоритмов программы управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Levinskiy V. N. Spectral analysis of various types of wood as the basis of low-temperature drying technology in vacuum conditions // BIO Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference «Methods for Synthesis of New Biologically Active Substances and Their Application in Various Industries of the World Economy – 2023» (MSNBAS2023), Moscow, 05–06 декабря 2023 года. Vol. 82. Les Ulis, 2024. P. 05026. DOI 10.1051/bioconf/20248205026.

2. Исследование влияния температуры окружающей среды на параметры пленочного электронагревателя / В. Н. Левинский, В. М. Попов, Е. Н. Епишков, В. А. Афонькина // Аграрный научный журнал. 2024. № 7. С. 110–116. DOI 10.28983/asj.y2024i7 pp110-116.

3. Шагеева А. И., Кайнов П. А., Сафин Р. Р. Разработка эффективной схемы энергообеспечения процесса вакуумной СВЧ сушки пиломатериалов // *Деревообрабатывающая промышленность*. 2022. № 3. С. 28–34.

4. Мухаметзянов Ш. Р., Сафин Р. Р., Кайнов П. А. Повышение энергоэффективной осциллирующей вакуумно-кондуктивной сушки пиломатериалов : монография / Минобрнауки России, Казан. нац. исслед. Технол. ун-т. Казань : Изд-во КНИТУ, 2019. 120 с.

5. Дунаев М. П., Дунаев А. М. Разработка автоматизированной системы научных исследований для изучения технологического процесса сушки древесины // *Современные технологии и научно-технический прогресс*. 2019. Т. 1. С. 132–133.

6. Левинский В. Н. Повышение эффективности процесса ИК-сушки пиломатериалов за счет адаптивности работы САУ // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2024. № 4(142). DOI 10.23670/IRJ.2024.142.131.

7. Levinskiy V. N. Justification of the effective distribution of energy emitted by a film electric heater on stacked lumber // *BIO Web of Conferences*. 2024. Vol. 108. P. 20001. DOI 10.1051/bioconf/202410820001.

8. Математическая модель процесса сушки пиломатериалов при дискретном расположении источников СВЧ-энергии / Р. С. Аипов, М. И. Тухватуллин, Р. Б. Яруллин [и др.] // *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2019. № 2(50). С. 82–88.

9. Rudobashta S. P., Zueva G. A., Zaytsev V. A. Modeling of the Deep Drying Process of Granulated Polyamide at Convective-infrared Energy Sub-supply // *ChemChemTech*. Vol. 62, № 12. 2019. P. 94–100.

10. Калачев Ю. Н., Онищенко Г. Б. Системы управления и моделирование электропривода. М. : ДМК Пресс, 2022. 154 с.

11. Верификация модуля расчета гидравлики в SIMINTECH / Е. А. Лисина, А. М. Самойлов, Н. П. Тарасова, В. В. Андреев // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2024. № 12. С. 148–151.

12. Захатнов В. Г., Белов А. В. Моделирование дифференциальной защиты трансформатора в среде MatLab // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2022. Т. 69, № 1(46). С. 19–25. DOI 10.22314/2658-4859-2022-69-1-19-25.

13. Оськин С. В. Моделирование аэродинамики в асинхронном электродвигателе // *АПК России*. 2023. Т. 30, № 1. С. 47–52. DOI 10.55934/2587-8824-2023-30-1-47-52.

14. Оськин С. В., Овсянников Д. А. Моделирование тепловых процессов в пчелином улье с электроподогревом // *Биофизика*. 2020. Т. 65, № 2. С. 381–389. DOI 10.31857/S0006302920010222.

REFERENCES

1. Levinskiy V. N. Spectral analysis of various types of wood as the basis of low-temperature drying technology in vacuum conditions // *BIO Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference «Methods for Synthesis of New Biologically Active Substances and Their Application in Various Industries of the World*

Economy – 2023» (MSNBAS2023), Moscow, 05–06 dekabrya 2023 goda. Vol. 82. Les Ulis, 2024. P. 05026. DOI 10.1051/bioconf/20248205026.

2. Levinskiy V. N., Popov V. M., Epishkov E. N., Afon'kina V. A. Issledovanie vliyaniya temperatury okruzhayushchej sredy na parametry plenochного elektronagrevatelya // *Agrarnyj nauchnyj zhurnal*. 2024. № 7. S. 110–116. DOI 10.28983/asj.y2024i7pp110-116.

3. Shageeva A. I., Kajnov P. A., Safin R. R. Razrabotka effektivnoj skhemy energoobespecheniya processa vakuumnoj SVCh sushki pilomaterialov // *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'*. 2022. № 3. S. 28–34.

4. Muhametzyanov Sh. R., Safin R. R., Kajnov P. A. Povyshenie energoeffektivnoj oscilliruyushchej vakuumno-konduktivnoj sushki pilomaterialov : monografiya / Minobrnauki Rossii, Kazan. nac. issled. tekhnol. un-t. Kazan' : Izd-vo KNIU, 2019. 120 s.

5. Dunaev M. P., Dunaev A. M. Razrabotka avtomatizirovannoj sistemy nauchnyh issledovaniy dlya izucheniya tekhnologicheskogo processa sushki drevesiny // *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskij progress*. 2019. T. 1. S. 132–133.

6. Levinskiy V. N. Povyshenie effektivnosti processa IK-sushki pilomaterialov za schet adaptivnosti raboty SAU // *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*. 2024. № 4(142). DOI 10.23670/IRJ.2024. 142.131.

7. Levinskiy V. N. Justification of the effective distribution of energy emitted by a film electric heater on stacked lumber // *BIO Web of Conferences*. 2024. Vol. 108. P. 20001. DOI 10.1051/bioconf/202410820001.

8. Matematicheskaya model' processa sushki pilomaterialov pri diskretnom raspolozhenii istochnikov SVCh-energii / R. S. Aipov, M. I. Tuhvatullin, R. B. Yarullin [i dr.] // *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. № 2(50). 2019. S. 82–88.

9. Modeling of the Deep Drying Process of Granulated Polyamide at Convective-infrared Energy Sub-supply / S. P. Rudobashta, G. A. Zueva, V. A. Zaytsev // *ChemChemTech*. V. 62, № 12. 2019. P. 94–100.

10. Kalachev Yu. N., Onishchenko G. B. Sistemy upravleniya i modelirovanie elektroprivoda. M. : DMK Press, 2022. 154 s.

11. Verifikaciya modulya rascheta gidravliki v SIMINTECH / E. A. Lisina, A. M. Samojlov, N. P. Tarasova, V. V. Andreev // *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya*. 2024. № 12. S. 148–151.

12. Zahahatnov V. G., Belov A. V. Modelirovanie differencial'noj zashchity transformatora v srede MatLab // *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2022. T. 69, № 1(46). S. 19–25. DOI 10.22314/2658-4859-2022-69-1-19-25.

13. Os'kin S. V. Modelirovanie aerodinamiki v asinhronnom elektrodvigatеле // *APK Rossii*. 2023. T. 30, № 1. S. 47–52. DOI 10.55934/2587-8824-2023-30-1-47-52.

14. Os'kin S. V., Ovsyannikov D. A. Modelirovanie teplofizicheskikh processov v pchelinom ul'e s elektropodogrevom // *Biofizika*. 2020. T. 65, № 2. S. 381–389. DOI 10.31857/S0006302920010222.

© Левинский В. Н., Епишков Е. Н., 2025

Поступила в редакцию 06.03.2025

Принята к печати 04.08.2025

РАЗРАБОТКА ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ТОЧНОГО ВЫСЕВА СЕМЯН ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ СЕЯНЦЕВ С ЗАКРЫТОЙ КОРНЕВОЙ СИСТЕМОЙ

А. Г. Авдеев, Е. В. Авдеева

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31

Аннотация. В настоящее время перспективным направлением является выращивание посадочного материала с закрытой корневой системой (ПМЗКС) и использование его для создания лесных культур. Современные технологии выращивания сеянцев с закрытой корневой системой позволяют в 10–20 раз экономить семена хвойных пород, по сравнению с посевом в открытый грунт. При выращивании посадочного материала по данной технологии основными актуальными направлениями являются: точный высев семян, эффективное использование пленочных теплиц, технологии и оборудование посева семян и ухода за сеянцами, рациональное использования семян, механизации процесса посадки лесных культур и дальнейшего ухода за ними. Основным устройством данного комплекса является оборудование для посева семян. В статье представлен аналитический обзор существующих аналогов сеялок для высева семян в кассеты. Принцип работы сеялки заключается в использовании вакуумного захвата семян, для надежного захвата одного семени в точке захвата в полой валу в точках захвата семян выполнены сквозные отверстия, которые способны захватить посредством разряжения внутри вала только по одному семени, что снижает вероятность случайного захвата двух и более семян и обеспечить при посеве заданное количество семян в каждой лунке. При сбросе семян из точек захвата вала в сборщик семян с распределительными трубками вакуум, удерживающий семена, сменяется на избыточное давление, которое позволяет сбросить семена и продуть отверстия захвата в валу. В статье представлена 3Д-Модель сеялки в сборе и 3Д-Модели отдельных устройств, экспериментальный образец устройства точного высева семян, Блок управления устройством точного высева семян. По результатам проведенной работы определена конструкция и оптимальные параметры устройства точного высева семян в кассеты для выращивания сеянцев с ЗКС, минимизировано потребление сжатого воздуха, увеличена скорость работы – один цикл посева за 3 секунды, что позволяет достичь производительность линии до 1200 кассет в час (100 тыс. семян в час), что превышает зарубежные и отечественные аналоги.

Ключевые слова: закрытая корневая система, Красноярск, лесоразведение, устройство точного высева семян.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 4, P. 56–63

DEVELOPMENT OF IMPORT-SUBSTITUTING EQUIPMENT FOR PRECISE SEEDING FOR GROWING SEEDLINGS WITH A CLOSED ROOT SYSTEM

A. G. Avdeev, E. V. Avdeeva

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

Annotation. At present, a promising direction is the cultivation of planting material with a closed root system (PMCRS) and its use to create forest crops. Modern technologies for growing seedlings with a closed root system allow saving coniferous seeds by 10–20 times compared to sowing in open ground. When using this technology for growing planting material, the main current trends are: precise sowing of seeds, efficient use of film greenhouses, technologies and equipment for sowing seeds and caring for seedlings, rational use of seeds, mechanization of the process of planting forest crops and further care for them. The main device of this complex is the equipment for sowing seeds. The article presents an analytical review of existing analogues of seeders for sowing seeds in cassettes. The principle of operation of the seeder is to use a vacuum seed capture. For reliable capture of one seed at the capture point in the hollow shaft, the holes are made at the seed capture points. They are able to capture only one seed by vacuum inside the shaft. That reduces the likelihood of accidental capture of two or more seeds and ensure the sowing of a given number of seeds in each well. When seed is dropped from the gripper points of the shaft into the Seed Collector with Distribution Tubes, the vacuum holding the seed is replaced by positive pressure, which allows the seed to be released and the gripper holes in the shaft to be blown out. The article presents a 3D Model of the complete seeder and 3D Models of individual devices, an experimental sample of the precision seeding device, a control unit for the precision seeding device. Based on the results of the work carried out, the design and optimal parameters of the device for precise seeding of seeds in cassettes for growing seedlings with CRS

were determined, compressed air consumption was minimized, and the operating speed was increased (one sowing cycle in 3 seconds) which makes it possible to achieve a line capacity of up to 1200 cassettes per hour (100 thousand seeds per hour), which exceeds foreign and domestic analogues.

Keywords: closed root system, Krasnoyarsk, afforestation, precision seeding device.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время перспективным направлением является выращивание посадочного материала с закрытой корневой системой (ПМЗКС) и использование его для создания лесных культур. Теория и практика производства посадочного материала с закрытой корневой системой постоянно совершенствуются как зарубежными, так и Российскими специалистами. Государственная программа Красноярского края «Охрана окружающей среды, воспроизводство природных ресурсов», утвержденная постановлением Правительства Красноярского края от 30.09.2019 № 512-п направлена на повышение качества среды, в том числе за счет совершенствования технологий по искусственному лесовосстановлению [1; 5; 6; 7; 8]. Современные технологии выращивания сеянцев с закрытой корневой системой позволяют в 10–20 раз экономить семена хвойных пород, по сравнению с посевом в открытый грунт. При выращивании посадочного материала по данной технологии (ЗКС) основными актуальными направлениями являются: точный высев семян, эффективное использование пленочных теплиц, технологии и оборудование посева семян и ухода за сеянцами, рациональное использования семян, механизации процесса посадки лесных культур и дальнейшего ухода за ними. При этом в России при выращивании сеянцев с ЗКС в основном используется импортное оборудование. Таким образом, одним из инновационных решений данной проблемы является разработка и внедрение импортозамещающего комплекса оборудования точного высева семян для выращивания сеянцев с закрытой корневой системой в

модульных теплицах параметры конструкции которых, оптимизированы под природно-климатические условия лесничеств Красноярского края с возможностью их адаптации к условиям других регионов России. Основным устройством данного комплекса является оборудование для посева семян. Далее представлен аналитический обзор существующих аналогов сеялок для высева семян в кассеты [9; 10].

Пневматическая рядная сеялка Mosa SP13A.

Сеялка является полуавтоматическим самостоятельным механизмом и предназначена для высева семян в различные кассеты (рис. 1). Особенностью сеялки является возможность работы без электрической сети, только от сжатого воздуха. Высевающее устройство состоит из лункообразователя, насадок под определенный вид кассеты, сопел для забора и высева семян [2]. Сеялка производит забор семян из углублений для семян в столике. Объем углублений мал для обеспечения работы сеялки без оператора, необходимо следить за наличием семян. Сеялка производит высев только одного ряда кассеты, технические характеристики приведены в табл. 1, габаритные размеры представлены на рис. 2.

Полуавтоматическая сеялка SIDTECH SSM.

Сеялка представлена на рис. 3. Вид на механизм высева семян представлен на рис. 4. Устройство для посева семян в кассету SSM может применяться в производствах различного типа, таких как: тепличный комбинат, теплица, рассадный комплекс или питомник растений. Машина используется для рядного посева семян в кассеты. Технические характеристики сеялки представлены в табл. 2.



Рис. 1. Общий вид сеялки Mosa SP13A

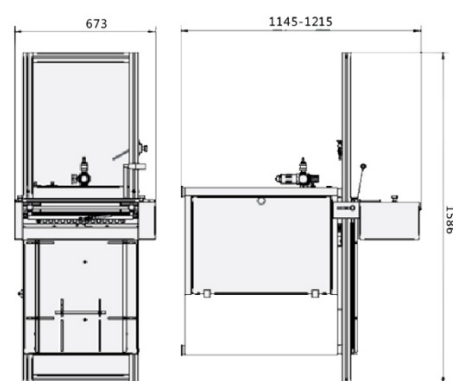


Рис. 2. Габаритные размеры сеялки

Таблица 1
Технические характеристики сеялки Mosa SP13A

Наименование	Показатель
Масса, кг	80
Габариты, мм	1586×673×1215
Скорость высева, ряд/мин	30
Потребление воздуха, л/мин	100
Макс. размер кассеты, мм	720×480×130

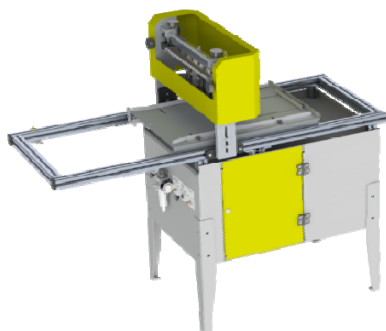


Рис. 3. Полуавтоматическая сеялка SIDTECH SSM



Рис. 4. Вид на механизм высева семян

Таблица 2

Технические характеристики сеялки SIDTECH SSM

Наименование	Показатель
Масса, кг.	70
Габариты, мм.	1420×675×1200
Скорость высева, ряд/мин.	30
Потребление воздуха, л/мин.	100
Макс. размер кассеты, мм.	600×400×130
Рабочее давление, бар.	6
Время среднего цикла посева одного ряда, сек	1,5–2

Преимущества: работает с дражированными и не дражированными семенами; существует возможность использовать кассеты разного размера; функция продувки сопел; функция отключения захвата семян [3]. Недостатки посевного устройства: возможность засева только одного ряда кассеты; необходимо следить за наличием семян в углублении для них.

Установка точного высева ВСС. Сеялка точного высева не является ни барабанной ни иглочной сеялкой, представлена на рис. 5. Поскольку сеялка точного высева действует без форсунок и иголок, она не требует частой очистки [4]. Принцип действия установки точного высева основан на силе тяжести, что обеспечивает высокую надежность и простоту обслуживания. Высевающий узел обычно состоит из двух головок (возможно 4). Семена помещаются в приемные лотки, стоящие перед вибропанелями. За счет вибрации семена подаются по канавкам на вращающиеся вальцы (рис. 6).

Во время высева валец захватывает одно семя для помещения его в ячейку. Когда кассета ставится в исходное положение, валец поворачивается на 180° и сбрасывает семена в трубки. Трубки крепятся к высевающей пластине, снабженной высевающими форсунками. Пластина опускается на кассету, и в центр каждой ячейки падает одно семя. Пластина поднимается в исходное положение, высевающие форсунки извлекаются из ячеек кассеты. Во время движения семян к вальцам провалившиеся мимо канавок семена собираются в контейнеры под вибропанелями. Данные семена вручную или автоматически возвращаются в приемные лотки. Для семян разных размеров и форм используются разные канавки и трубки. В зависимости от качества семян возможен высев одного, двух и трех семян. Для более крупных кассет также возможна дополнительная остановка под высевающей головкой [11]. Технические характеристики сеялки представлены в табл. 3.



Рис. 5. Установка точного высева ВСС



Рис. 6. Вид на механизм высева семян

Таблица 3
Технические характеристики сеялки SIDTECH SSM

Наименование	Показатель
Масса, кг.	65
Габариты, мм.	770×600×1620
Скорость высева, кассет/мин.	18
Потребление воздуха, л/мин.	100
Рабочее давление, бар.	6

Преимущества посевного оборудования: точное помещение одного семени в центр каждой ячейки кассеты; быстрое и надежное функционирование в ходе высева за счет принципа действия, основанного на силе тяжести; работа с семенами широкого спектра размеров (1–11 мм) и форм, включая гранулированные семена; возможен высев одного, двух и трех семян; совместимость с разными типами кассет; требует минимума техобслуживания [4].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является разработка устройства точного высева семян для выращивания сеянцев с закрытой корневой системой. Задачи научно-исследовательской работы: теоретическое обоснование, аналитические и экспериментальные исследования конструктивных и кинематических параметров, электрической схемы и программы управления устройства точного высева семян (УТВ); обоснование режимов работы УТВ, изготовление экспериментального образца [11; 12; 13; 14]. Оптимизация режимов работы УТВ: производительности посева семян (шт./ч), вибрационных характеристик элемента подачи семян к барабану захвата семян, сечений отверстий захвата семян на барабане, давления разряжения/сжатия в барабане и его угловой скорости поворота (рад./с); доработка конструкции на основании результатов лабораторных и производственных испытаний, корректировка конструкторской документации; изготовление опытного образца.

За основу конструкции устройства точного высева взята компоновка сеялки шведской компании ВСС АВ. Подача семян на вибростол производится из бункера, количество семян регулируется зазором между бункером и вибросолом. За счет вибрации наклонного стола между направляющими на столе производится выстраивание семян в последовательные цепочки к точкам захвата семян поворотным валом.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Спроектированное устройство точного высева семян рассчитана для использования в тепличных комплексах для выращивания сеянцев с закрытой корневой системой. Конструкция сеялки позволяет, засеивать три ряда кассеты Плантек 81Ф размерами 9×9 ячеек, общий размер кассеты 385×385 мм, или отечественных кассет РКЛ-81 производства ООО «АГРО-ПЛАСТ», Татарстан. Предполагается использование кассет других конфигураций отечественных производителей с количеством ячеек 100 (10×10 ячеек) и 121 (11×11 ячеек), при смене оснастки сеялки. При проектировании сеялки, в расчет бралась возможность

установки на линии точного высева трех сеялок последовательно на одно, или на два кассета-места для одновременного высева семян в кассету размером РКЛ-81 (9×9) ячеек, или РКЛ-100 (10×10), или РКЛ-121 (11×11). Для надежного захвата одного семени в точке захвата в полой валу в точках захвата семян выполнены сквозные отверстия диаметром 0,35 мм, которые способны захватить посредством разряжения внутри вала только по одному семени, что снижает вероятность случайного захвата двух и более семян и обеспечить при посеве заданное количество семян в каждой лунке. При сбросе семян из точек захвата вала в сборщик семян с распределительными трубками вакуум, удерживающий семена, сменяется на избыточное давление, которое позволяет сбросить семена и продуть отверстия захвата в валу.

Принцип работы сеялки заключается в использовании вакуумного захвата семян. Рабочий орган представляет собой полый вал с выполненными в нем отверстиями для захвата семян (рис. 7). Вал представляет собой полую трубу с последовательным рядом 27 отверстий диаметром 0,35 мм для захвата семян с помощью разряжения внутри трубы для одновременного засева трех рядов по девять ячеек, или соответственно 30 и 33 отверстия для засева в кассеты 10×10 и 11×11. С торцов трубы закреплены ступицы, одна из которых является заглушкой и имеет посадку под радиальный подшипниковый узел, закрепленный к корпусу сеялки, обеспечивающий радиальную и осевую фиксацию вала. Сквозь крышку вал выведен наружу для крепления зубчатого шкива ременной передачи, через которую передается крутящий момент от шагового двигателя к валу, являющегося рабочим органом сеялки. Другая ступица с противоположного конца вала представляет собой полый вал со сквозным отверстием вдоль оси с посадкой под подшипник скольжения из фторопластовой втулки, которая осуществляет радиальную фиксацию вала и герметизацию узла. Через сообщающиеся последовательные отверстия в ступице и в опорной крышке осуществляется подача разряжения/ избыточного давления воздуха через систему пневматических клапанов внутрь полого вала с отверстиями захвата семян. Подшипник скольжения запрессован в опорную крышку с резьбовым выходным отверстием для подключения пневматического шланга, идущего от пневматического клапана (пневмораспределителя). Опорная крышка закреплена к противоположной опоре сеялки.

После захвата семян, вал поворачивается на 180° к сборщику, в это время сбрасывается вакуум внутри полого вала, подается избыточное давление, семена падают в отверстия сборщика и по распределяющим трубкам опускаются вниз к трем рядам выходных

трубок, попадая в подвижные сопла (дозаторы) (рис. 8). В сеялке от сборщика идет три вида трубок: прямые, загнутые под 25° и 35°.

Подача семян в область захвата валом осуществляется с помощью вибростола с разделителями, формирующими последовательную подачу семян друг за другом к отверстиям в рабочем органе (рис. 9). Вибрация стола осуществляется при помощи электромагнита, закрепленного на пластине под столом, на который подается электрический сигнал с регулируемой

частотой и амплитудой для выбора наиболее эффективного режима для конкретного вида семян. Стол наклонен на 7° для осуществления скатывания семян. На стол семена поступают из бункера, закрепленного выше с зазором между столом и бункером (рис. 10). Предусмотрена возможность регулировки зазора. В момент падения семян по трубкам осуществляется опускание пластины с дозаторами к лункам в кассете. Опускание и фиксация пластины осуществляется с помощью двух пневмоцилиндров (рис. 11) [13; 14].



Рис. 7. 3D-модель рабочего органа сеялки

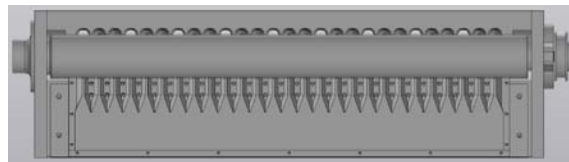


Рис. 9. 3D-модель вибростола с разделителями

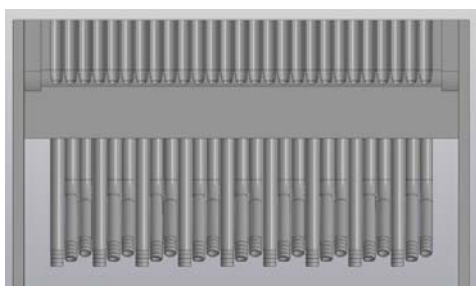


Рис. 8. 3D-модель сборщика семян и распределяющих трубок

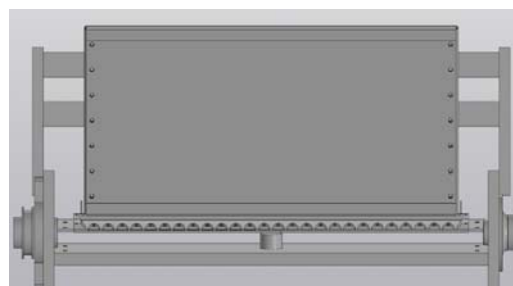


Рис. 10. 3D-модель бункера для семян

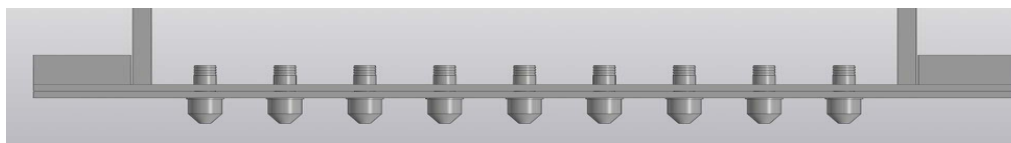


Рис. 11. 3D-модель пластины с дозаторами и пневмоцилиндрами

Конструкция устройства разрабатывалась с использованием средств объемного моделирования. Построена 3D-модель, благодаря чему получена возможность проверки взаимного расположения деталей и узлов, возможность автоматизированного построения чертежей. На основе 3D-модели были разработаны ассоциативные чертежи устройства точного высева.

Изготовление опытного устройства точного высева семян для выращивания сеянцев с закрытой корневой системой. Изготовление основных деталей устройства производилось в компании ООО «Инжиниринговая компания «СИБИНЖИНИРИНГ» методом автоматического фрезерования исходных материалов на вертикально-фрезерном обрабатывающем центре HAAS VF-2. В процессе изготовления некоторых деталей было выполнено объединение нескольких деталей в одну. В большинстве деталей при обработке использованы простые концевые твердосплавные фрезы R 2-5, инструмент для нарезания резьбы, для фрезерования наклонных плоскостей применялись радиусные фрезы. Обработка осуществлялась на средних режимах резания, возможно увеличение скорости обработки при серийном производстве. Значительных затрат машинного време-

ни требуют детали: Дистрибьютор семян; Сборщик левый, правый; Опора бункера; Держатель стола; Подвижная пластина; Проставка; Проставка под регулировочный винт; Опора подшипника; Опора крышки; Неподвижная пластина. Изготовление деталей Устройства производилось методом плазменной резки листовой заготовки на установке плазменной резки с ЧПУ Foxweld 1500×3000 и последующей обработки на листогибочном прессе SHPB 255 с ЧПУ. Изготовление данных деталей в серийном производстве возможно в больших количествах с незначительными затратами времени: Передняя панель бункера; Корпус бункера.

Изготовление деталей Устройства производилось методом токарной обработки на универсальном токарном станке DMTG CW6280E/2000. Ввиду особенностей работы на универсальном токарном станке для увеличения скорости обработки при серийном производстве необходимо рассмотреть возможность изготовления деталей на автоматическом токарном станке: Вал; Ступица с осью; Опорная крышка; Ступица с отверстием; Фторопластовая втулка; Нижний штуцер; Трубка под углом 35; Трубка прямая; Трубка под углом 17. Изготовление детали Дозатор производилось на токарном автоматическом станке DMTG

SK50P с ЧПУ. Изготовление данных деталей в серийном производстве возможно в больших количествах с незначительными затратами времени:

Изготовление стола Устройства производилось из исходных материалов в несколько этапов: заготовительные работы на ленточнопильном станке, разметка отверстий, крепежных пазов и технологических окон на вертикально-фрезерном обрабатывающем центре, сверление отверстий, фрезерование пазов и окон производилось на сверлильно-фрезерном станке, сборка и сварка производилась полуавтоматическим сварочным аппаратом START MIG3500T. Раскрой листа производилось методом плазменной резки листовой развертки на установке плазменной резки с ЧПУ Foxweld 1500×3000. Для увеличения скорости обработки при серийном производстве требуется изготовление кондукторов и технологической оснастки (рис. 12).

Управление устройством (электрический шкаф) состоит из программируемого реле ПР200-24 производства «Овен», Россия, блока питания 24 вольта для ПР200-24 и вспомогательных устройств, блока управления приводом вала захвата семян, блока управления электродвигателем вибратора. Входящее напряжение в шкаф управления однофазная сеть 220В, основное напряжение питания устройств шкафа – 24В постоянного тока, питание отдельных устройств – 5В постоянного тока. Программирование реле ПР200-24 осуществляется посредством среды программирования для создания алгоритмов работы программируемых реле OwenLogic, непосредственно в шкафу управления Устройством. Программируемое реле ПР200-24 предназначено для управления длительностью, последовательностью и очередностью включения основных и вспомогательных устройств и механизмов Устройства. Установка вышеуказанных режимов производится в программе, изменение параметров пользователями без соответствующей квалификации, невозможно. Блок питания 24В предназначен для питания всех электрических потребителей Устройства. Блок управления приводом вала захвата семян и блок управления электродвигателем вибратора предназначен для изменения режима работы электродвигателей (рис. 13).

Изготовление и настройка пневматического шкафа управления устройством точного высева. Пневматический шкаф управления Устройством состоит из блока воздухоподготовки с автоматическим фильтром-влажнотделителем и запорным клапаном,

генератора вакуума, блока электромагнитных клапанов для управления пневмоцилиндрами подъема/ опускания и управления давлением в вале захвата семян. Требования к подключаемому воздуху – сжатый воздух по ГОСТ 17433 не ниже 3 класса, входящее давление – не менее 7 бар и не более 10 бар. Рабочее давление пневматического шкафа управления – 7 бар. Установка рабочего давления производится в пневматическом шкафу управления по встроенному в блок воздухоподготовки указателю давления (рис. 13).

Блок воздухоподготовки предназначен для очистки входящего воздуха от загрязнений, автоматического удаления конденсата из поступающего воздуха, управления рабочим давлением, индикации рабочего давления. Запорный клапан блока воздухоподготовки автоматически прекращает подачу воздуха при отключении Устройства от электропитания. Генератор вакуума предназначен для создания вакуума в вале захвата семян при захвате семян. Блок электромагнитных клапанов обеспечивает подачу воздуха под давлением либо вакуума в соответствующие устройства в зависимости от фазы цикла Устройства. Блок электромагнитных клапанов управляется программируемым реле ПР200-24.

Оптимизация режимов работы устройства точного высева. Изменение параметров, таких как длительность, порядок, последовательность и очередность фаз цикла осуществляется в управляющей программе. Наибольшее значение для оптимизации работы Устройства имеют следующие параметры: скорость вращения электромотора привода вала захвата семян, длительность фазы избыточного давления и разрежения в вале захвата семян. Частота включений привода вибратора не имеет непосредственного влияния на скорость работы Устройства, однако имеет влияние на стабильность работы, распределяя семена ровно для захвата и не допуская пропусков. Вышеуказанные параметры меняются в программе управления. Вторая составляющая оптимальной работы Устройства – сечение отверстий в вале для захвата семян. Данный параметр подбирается экспериментально. В ходе проведения испытаний экспериментальным путем были установлены оптимальные параметры управляющей программы и установлен вал с минимально возможным сечением отверстий. В ходе проведения испытаний отказов, сбоев, нарушения циклов, прочих неисправностей Устройства, не выявлено.



Рис. 13. Экспериментальный образец устройства точного высева семян



Рис. 14. Электрический шкаф управления устройством точного высева семян

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование посадочного материала с закрытой корневой системой имеет ряд других существенных преимуществ перед обычными сеянцами и саженцами. В частности, сеянцы с закрытой корневой системой лучше приживаются в неблагоприятных лесорастительных условиях, хорошо переносят транспортировку на большие расстояния, а главное позволяют значительно продлить лесокультурный сезон. Кроме того, к преимуществам посадочного материала с закрытой корневой системой можно отнести: более короткий период выращивания крупномерного посадочного материала и лучшую приживаемость некоторых пород, в частности, сосны обыкновенной и псевдотсуги. Последнее позволяет обеспечить успешное создание лесных культур даже в трудных лесорастительных условиях, включая щебнистые отвалы, карьеры и другие нарушенные земли. Высокая приживаемость лесных культур позволяет сократить количество посадочных мест на единице лесокультурной площади и тем самым более эффективно использовать селекционные семена. По результатам проведенной работы определена конструкция и оптимальные параметры устройства точного высева семян в кассеты для выращивания сеянцев с ЗКС, минимизировано потребление сжатого воздуха, увеличена скорость работы – один цикл посева за 3 секунды, что позволяет достичь производительность линии до 1200 кассет в час (100 тыс. семян в час), что превышает зарубежные и отечественные аналоги. Последующие этапы работы позволят разработать автоматизированный комплекс оборудования для посева семян и выращивания сеянцев с ЗКС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Теория и практика искусственного лесовосстановления : учебник / А. Р. Родин, С. Б. Васильев, С. А. Родин [и др.]. Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. 164 с. ISBN 978-5-7038-5113-5. Текст: электронный // Лань : электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/205838>.
2. INNOVATECH. Техника, теплицы и оборудование. URL: <https://www.innovatech.by/Пневматическая-рядная-сеялка/>. Текст: электронный.
3. SIDTECH. Первый российский производитель оборудования для тепличных комбинатов и питомников растений. URL: https://sidtech.ru/ssm?utm_source=yandex-direct&term=Сеялка%20для%20кассет&yclid=3468944315922537970 Текст: электронный.
4. ООО «Леснаб». Приборы и оборудование для лесного хозяйства. URL: <https://lessnabr.ru/catalog/lesvosst/zks/seyalka/> Текст: электронный.
5. Гоф А. А. Эффективность создания лесных культур сосны обыкновенной сеянцами с закрытой корневой системой в ленточных борях Алтая/ Екатеринбург 2020. 169 с. URL: <https://www.dissercat.com/content/effektivnost-sozdaniya-lesnykh-kultur-sosny-obyknovennoi-seyantsami-s-zakrytoi-kornevoi-sist>
6. Лесные культуры в Бузулукском бору : учеб. пособие для студентов специальности 1512 / Г. И. Редько, В. М. Невзоров, И. М. Невзоров, А. А. Хиров. Ле-

нинград : Ленинградская лесотехническая академия, 1985. 88 с

7. Писаренко А. И., Редько Г. И., Мерзленко М. Д. Искусственные леса. Часть 1. М. : Изд-во ЮНИФИР, совместно с ВНИИЦлесресурс, 1992. 308 с.

8. Писаренко А. И., Мерзленко М. Д. Создание искусственных лесов. М. : Агропромиздат, 1990. 269 с.

9. Шпагин Д. Е., Коршун В. Н. Повышение эффективности лесовыращивания // Лесоэксплуатация и комплексное использование древесины : сборник статей Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск : СибГУ, 2020. С. 224–227.

10. Шпагин Д. Е., Коршун В. Н. Лесовосстановление на переувлажненных почвах мерзлотной зоны Сибири // Лесоэксплуатация и комплексное использование древесины : сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск : СибГУ, 2021. С. 291–294.

11. Рогова Е. А., Шпагин Д. Е., Суранов М. С. Проектирование вала по поперечным колебаниям // Детали машин: инновационные достижения проектирования и использования на современном этапе развития промышленности : сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск : СибГУ, 2021. С. 65–68.

12. Авдеева Е. В., Ровных Н. Л., Шпагин Д. Е. Опорная конструкция линии для засева сеянцев с зкс // Технологии и оборудование садово-паркового и ландшафтного строительства : сборник статей Международной научно-практической конференции. Красноярск : СибГУ, 2022. С. 239–241.

13. Конструкторские решения разрабатываемого устройства точного высева семян / Е. В. Авдеева, Д. Е. Шпагин, Н. Л. Ровных, Д. В. Черник // Технологии и оборудование садово-паркового и ландшафтного строительства : сборник статей X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Красноярск : СибГУ, 2023. С. 369–373.

14. Устройство точного высева семян для выращивания сеянцев с закрытой корневой системой / Д. Е. Шпагин, Н. Л. Ровных, Е. В. Авдеева, А. Г. Авдеев, С. С. Шатохин // 3d-технологии в решении научно-практических задач : сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск : СибГУ, 2023. С. 200–203.

REFERENCES

1. Teoriya i praktika iskusstvennogo lesovosstanovleniya : uchebnik / A. R. Rodin, S. B. Vasil'yev, S. A. Rodin [i dr.]. Moskva : MGTU im. N. E. Bauman, 2019. 164 s. ISBN 978-5-7038-5113-5. Tekst : elektronnyy // Lan' : elektronno-bibliotchnaya sistema. URL: <https://e.lanbook.com/book/205838>.
2. INNOVATECH. Tekhnika, teplitsy i oborudovaniye. URL: <https://www.innovatech.by/Пневматическая-рядная-сеялка/>. Tekst: elektronnyy.
3. SIDTECH. Pervyy rossiyskiy proizvoditel' oborudovaniya dlya teplichnykh kombinatov i pitomnikov rasteniy. URL: https://sidtech.ru/ssm?utm_source=yandex-direct&term=Seyalka%20dlya%20kasset&yclid=3468944315922537970. Tekst: elektronnyy.

4. ООО «Lessnab». Pribory i oborudovaniya dlya lesnogo khozyaystva URL: <https://lessnabr.ru/catalog/lesvosst/zks/seyalka/>. Tekst: elektronnyy.
5. Gof A. A. Effektivnost' sozdaniya lesnykh kul'tur sosny obyknovennoy seyantsami s zakrytoy kornevoy sistemoy v lentochnykh borakh Altaya/ Yekaterinburg 2020 g. 169 s. URL: <https://www.dissercat.com/content/effektivnost-sozdaniya-lesnykh-kultur-sosny-obyknovennoi-seyantsami-s-zakrytoi-kornevoi-sist>.
6. Lesnyye kul'tury v Buzulukskom boru. Uchebnoye posobiye dlya studentov spetsial'nosti 1512 / G. I. Red'ko, V. M. Nevzorov, I. M. Nevzorov, A. A. Khiron. Leningrad : Leningradskaya lesotekhnicheskaya akademiya, 1985. 88 s
7. Pisarenko A. I., Red'ko G. I., Merzlenko M. D. Iskusstvennyye lesa. Chast' 1. M. : Izd-vo YUNIFIR, sovmestno s VNIITSlesresurs, 1992. 308 s.
8. Pisarenko A. I., Merzlenko M. D. Sozdaniye iskusstvennykh lesov. M. : Agropromizdat, 1990. 269 s.
9. Shpagin D. Ye., Korshun V. N. Povysheniye effektivnosti lesovyrashchivaniya // Lesoekspluatatsiya i kompleksnoye ispol'zovaniye drevesiny : sbornik statey Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Krasnoyarsk : SibGU, 2020. S. 224–227.
10. Shpagin D. Ye., Korshun V. N. Lesovosstanovleniye na pereuvlazhnennykh pochvakh merzlotnoy zony Sibiri // Lesoekspluatatsiya i kompleksnoye ispol'zovaniye drevesiny : sbornik statey Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Krasnoyarsk : SibGU, 2021. S. 291–294.
11. Rogova Ye. A., Shpagin D. Ye., Suranov M. S. Proyektirovaniye vala po poperechnym kolebaniyam // Detal' mashin: innovatsionnyye dostizheniya proyektirovaniya i ispol'zovaniya na sovremennom etape razvitiya promyshlennosti : sbornik statey Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Krasnoyarsk : SibGU, 2021. S. 65–68.
12. Avdeyeva Ye. V., Rovnykh N. L., Shpagin D. Ye. Opornaya konstruktsiya linii dlya zaseva seyantsev s zks // Tekhnologii i oborudovaniye sadovo-parkovogo i landshaftnogo stroitel'stva : sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Krasnoyarsk : SibGU, 2022. S. 239–241.
13. Konstruktorskiye resheniya razrabatyvayemogo ustroystva tochnogo vyseva semyan / Ye. V. Avdeyeva, D. Ye. Shpagin, N. L. Rovnykh, D. V. Chernik // Tekhnologii i oborudovaniye sadovo-parkovogo i landshaftnogo stroitel'stva : sbornik statey X Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. Krasnoyarsk : SibGU, 2023. S. 369–373.
14. Ustroystvo tochnogo vyseva semyan dlya vyrashchivaniya seyantsev s zakrytoy kornevoy sistemoy / D. Ye. Shpagin, N. L. Rovnykh, Ye. V. Avdeyeva, A. G. Avdeyev, S. S. Shatokhin // 3d tekhnologii v reshenii nauchno-prakticheskikh zadach : sbornik statey Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Krasnoyarsk : SibGU, 2023. S. 200–203.

© Авдеев А. Г., Авдеева Е. В., 2025

Поступила в редакцию 02.06.2025
Принята к печати 04.08.2025

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

УДК 676.1

DOI: 10.53374/1993-0135-2025-4-64-74

Хвойные бореальной зоны. 2025. Т. XLIII, № 4. С. 64–74

ДИНАМИКА КОНТАКТА СТРУИ СУСПЕНЗИИ С ПРЕГРАДОЙ ПРИ РАЗМОЛЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Ю. Д. Алашкевич, А. В. Ушаков

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: alashkevichud@sibsau.ru

Аннотация. Известно, что процесс размол волокнистых полимеров из хвойной и лиственной древесины является очень важным в технологии получения бумаги и картона. Для этой цели используются ножевой и безножевой способы размол. Из практики осуществления этого процесса в технологии получения готового продукта в целлюлозно-бумажном производстве в подавляющем большинстве случаев используют ножевой размол.

При использовании ножевого размол основным воздействием на волокно считают механическое. Вместе с тем, с повышением скорости вращения ротора ножевых мельниц серьезную роль в процессе размол волокнистых полуфабрикатов начинают играть гидродинамические воздействия при течении волокнистых суспензий в рабочих зонах ножевых машин. До сих пор не ясно, при каких скоростях движения волокнистых суспензий необходимо учитывать воздействие гидродинамических сил на процесс размол.

Для решения поставленной задачи, в работе проведен анализ контакта струи суспензии с преградой при размол растительных полимеров. Явление контакта суспензии при размол наблюдается как в безножевых, так и в ножевых установках. В ножевых машинах потоки суспензии при течении контактируют с внутренними поверхностями ротора и статора, а особенно они ударяются о поверхности рабочих органов мельницы.

В связи с этим, в работе проведен расчет мгновенного удара струи суспензии с преградой.

Ключевые слова: размол, гидродинамика, ножевой способ, течение суспензии, контакт жидкости с преградой.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 4, P. 64–74

DYNAMICS OF CONTACT OF THE SUSPENSION JET WITH AN OBSTACLE DURING GRINDING OF PLANT POLYMERS

Yu. D. Alashkevich, A. V. Ushakov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: alashkevichud@sibsau.ru

Abstract. It is known that the process of grinding fibrous polymers from coniferous and deciduous wood is very important in the technology of producing paper and cardboard. Knife and non-knife grinding methods are used for this purpose. From the practice of this process, knife grinding is used in the technology of obtaining the finished product in pulp and paper production in the vast majority of cases.

When using knife grinding, the main effect on the fiber is considered to be mechanical. At the same time, with an increase in the speed of rotation of the rotor of knife mills, hydrodynamic effects during the flow of fibrous suspensions in the working areas of knife machines begin to play a serious role in the process of grinding fibrous semi-finished products. It is still not clear at what speeds of movement of fibrous suspensions it is necessary to take into account the effect of hydrodynamic forces on the grinding process.

To solve this problem, the analysis of the contact of the suspension jet with an obstacle during grinding of plant polymers was carried out. The phenomenon of suspension contact during grinding is observed in both knife-free and knife installations. In knife machines, the slurry flows during the process come into contact with the inner surfaces of the rotor and stator, and especially they hit the surfaces of the working bodies of the mill.

In this regard, the calculation of the instantaneous impact of a suspension jet with an obstacle was carried out.

Keywords: grinding, hydrodynamics, knife method, suspension flow, liquid contact with an obstacle.

ВВЕДЕНИЕ

В ножевых размалывающих машинах считают, что процесс размола растительных полимеров из хвойных и лиственных пород древесины осуществляется в основном за счет механического воздействия ножей гарнитуры на волокно.

Наряду с механическими воздействиями на волокно при размоле волокнистых полуфабрикатов серьезное воздействие начинают оказывать гидродинамические силы, связанные с характером течения волокнистой суспензии в зоне рабочих органов размалывающих машин. И, в частности, при течении волокнистой суспензии потоки её ударяются о рабочие органы гарнитуры и о внутренние поверхности мельницы.

Возникает вопрос, при каких режимах течения волокнистой суспензии необходимо учитывать гидродинамический эффект размола? Для ответа на этот вопрос обратимся к процессам, которые мы наблюдаем в быту.

Частенько капля дождя, падая с крыши, имеющей определенную высоту, разрушает поверхность, на которую эта капля падает. Причем разрушению подвергаются такие материалы как камень, бетон, кирпич, ракушечник и другие. Чем это можно объяснить?

В своей книге «Капля» Я. Е. Гегузин объясняет это просто, и с этим трудно не согласиться [1]. Оказывается, для получения эффекта разрушения материала при падении капли необходимо, чтобы она достигла определенной величины скорости падения. При достижении этой скорости, создаются усилия, позволяющие разрушать материалы, с которыми капля контактирует.

Аналогичная картина наблюдается при течении волокнистой суспензии внутри корпуса ножевой размольной установки. Попадая внутрь мельницы, потоки суспензии ударяются о стенки корпуса и о поверхности рабочих гарнитур, за счет чего и происходит разрушение волокон суспензии.

Для определения скорости течения волокнистой суспензии в размольной установке и величины сил, воздействующих на волокно при размоле, обратимся к рассмотрению этих зависимостей при ударе струи суспензии о неподвижную преграду в специализированной размольной установке.

В качестве предмета исследования принята установка, разработанная и изготовленная авторами [2]. Имея приоритет, защищенный авторскими свидетельствами и патентами, установка, основанная на безножевом способе размола, позволяет провести теоретические и экспериментальные исследования процесса размола с изучением основных физических и гидродинамических явлений, сопровождающих процесс обработки волокон. К таким физическим явлениям, сопровождающим процесс размола в установке, можно отнести удар волокнистой суспензии о твердую преграду.

АНАЛИЗ РАЗМОЛА ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ РАЗМАЛЫВАЮЩИХ УСТАНОВОК

Отсутствие стройной и хорошо разработанной теории размола размольных машинах заставляет исследователей при изыскании новых, более эффектив-

ных принципов размола целлюлозных материалов в водной среде опираться на сумму опытов, накопленных в течение большого периода времени. В связи с этим в последние годы в литературе описан ряд специальных размалывающих аппаратов, которые пытаются применить в целлюлозно-бумажном производстве.

Специальными размалывающими машинами считают машины, у которых расположение рабочих органов отличается от обычного ножевого. К числу таких машин можно отнести: центробежно-пульсационные, кавитационные, ультразвуковые аппараты, аппараты типа «струя-преграда», аппараты с использованием ферромагнитных тел.

Существует несколько противоречивых точек зрения на динамику процесса размола массы в этих аппаратах. Особенно хорошо это противоречие прослеживается в центробежно-пульсационных аппаратах (ЦПА) и аппаратах типа пакетного генератора. Автор ЦПА профессор Р. Виллемс [3] считает, что основным фактором, обуславливающим расщепление пучков волокон, является возникновение в потоках обрабатываемой суспензии высокочастотных колебаний, достигающих частоты порядка миллиона герц и выше. Он полагает, что при работе генератора высокочастотных колебаний типа ЦПА все элементы его рабочих органов (щели, их стенки, кольцообразные зазоры между рядами камер и вентиль, регулирующий давление), с одной стороны, и суспензия, проталкиваемая через ряды щелей и зазоры, с другой стороны, образуют единую «принудительную кинематическую цепь». В этой кинематической цепи рабочие органы генератора играют роль жестких элементов в цепи, а суспензия, движущаяся через щели и зазоры, может рассматриваться как деформируемый элемент. О. Фукс [3] разделяет взгляды Р. Виллемса.

Другие авторы [4; 5], проводившие исследования работы центробежно-пульсационного аппарата, оспаривают утверждения Р. Виллемса, и считают, что частота колебаний, возникающих в суспензии, составляет несколько тысяч герц. Следовательно, расщепление пучков волокон обусловлено не высокочастотными колебаниями этой среды, а, в первую очередь, механическим ударным воздействием рабочих органов и гидродинамическими усилиями сдвига, а также пульсациями давления. Причем считается, что процесс механических ударных воздействий играет главную роль в расщеплении пучков волокон.

Исследователи, В. Н. Гончаров, А. А. Гаузе, В. П. Аликин [6] считают, что обработка волокнистых материалов в этих аппаратах обеспечивается совокупностью ряда физических явлений, таких как:

- ударное воздействие быстро движущихся относительно друг друга волокон и твердых элементов аппарата;
- кавитационное воздействие, которое обусловлено явлениями возникновения пузырьков, их развития и захлопывания при определенных условиях в жидкости и взаимодействия их с волокнистым материалом;
- пульсационное воздействие за счет чередования повышения и понижения гидравлического давления в суспензии;
- действие сил трения.

В кавитационных аппаратах разработка волокнистой суспензии происходит, по мнению авторов [7], за счет захлопывания пузырьков или эрозионного разрушения материалов. А. Д. Перник [8] считает, что явление кавитации заключается в образовании разрывов сплошности в некоторых участках потоков движущейся капельной жидкости. Наступление кавитации характеризуется появлением в непрерывной жидкой сфере мельчайших парогазовых пузырьков, объем которых быстро возрастает по мере снижения давления.

Причиной образования пузырьков является кипение жидкости при нормальной температуре и низком давлении [3; 8; 9].

В понятие кавитации также входит и то воздействие, которое данные пузырьки оказывают на среду и находящийся в ней материал. Размеры полостей возникающих пузырьков колеблются от субмикроскопических до весьма больших. Длительность их существования различна.

А. Ф. Метелкин [10] и М. Г. Сиртюк [11] считают, что температура жидкости оказывает значительное влияние на интенсивность ударных волн и на величину кавитационной эрозии различных материалов. Однако, повышение температуры не сказалось на увеличении скорости размол [34], а, наоборот, привело к ее значительному снижению.

В. Н. Гончаров, А. А. Гаузе и В. П. Аликин [6] не согласны с выводами Д. С. Добровольского [13]. Они отмечают, что размол волокон носит усталостный характер, а ударные волны, возникающие при захлопывании пузырьков, не оказывают существенного влияния на размол. Имеющиеся в работе [13] сведения о влиянии кавитации на размол целлюлозных волокон, по их мнению, преувеличены.

К аппаратам, использующим эффект кавитационных явлений при размоле волокнистой массы можно отнести: кавитационный аппарат Б. С. Петрова и М. И. Леонова [14]. В этом аппарате масса под давлением от 1 до 1,5 МН/м² подводится по коллектору к диафрагме с коноидальным отверстием. За счет сужения отверстия в диафрагме и перепада давления до и после диафрагмы скорость массы увеличивается до критической, и масса направляется на поверхность кавитатора. Здесь скорость возрастает и статическое давление массы понижается, в результате чего вода на поверхности кавитатора выкипает, образуется большое количество пузырьков в массе, которые в общем потоке переносятся в полость высокого давления от 0,2 до 0,5 МН/м², где пузырьки интенсивно захлопываются, вызывая местные гидравлические удары. Происходит роспуск макулатуры на отдельные волокна.

Представляет интерес аппарат Э. В. Шемякина [15]. Работа этого аппарата для размолы волокнистой массы основана на создании прямого гидравлического удара, за счет чего и осуществляется размол.

Большая работа в области создания аппаратов, основанных на кавитационном эффекте и исследованиях процессов, происходящих в них при размоле волокнистой массы, проведена Р. А. Солоницыным, Л. А. Горбачевым и др. [16–18].

За основу всех их изобретений принят кавитационный размалывающий аппарат. Волокнистую суспензию концентрацией 3–4 % под давлением от 20 до 40 м водяного столба подавали в сужающееся устройство кавитационной камеры при скорости потока от 20 до 30 м/с. В месте расширения сжатой струи суспензии волокна создавалось гидродинамическое кавитационное поле, которое оказывало размалывающее воздействие на волокно.

В работе [18] авторы совмещают ножевой размол волокнистой суспензии в конических мельницах с кавитационной разработкой ее в аппарате.

Вопросами воздействия на целлюлозу частых гармонических колебательных движений в звуковом и ультразвуковом диапазоне занимался Д. С. Добровольский [13]. Основываясь на работах [19–22], где принцип генерирования колебаний в жидкой среде был использован для суспензирования в воде масел, растворения красителей и других целей, Д. С. Добровольский пытается этот принцип заложить в аппарат, специально созданный им для размолы волокнистых суспензий. Он рассматривает общие положения природы колебательных движений в технике и пытается с этой точки зрения объяснить процесс размолы волокон [13]. Рассматривая целлюлозные волокна как твердые тела цилиндрической формы, он считает, что на них в водной среде действуют продольные, поперечные и поверхностные звуковые волны [13]. В твердых телах, следовательно, и в целлюлозе, сдвиговая сила вызывает поперечные волны. Скорость волны сдвига составляет ≈ 48 % скорости продольной волны в том же материале. Наиболее ее низкое значение соответствует короткой волне. Величина скорости поверхностных волн составляет около одной десятой величины скорости поперечных волн [13].

Д. С. Добровольский объясняет механизм процесса размолы волокон с точки зрения акустических колебаний следующим образом. При колебании твердого тела в упругой среде возникают попеременно области разрежения и сжатия. Колеблющиеся частицы среды оказываются то в области разрежения, то в области сжатия со значительным разрывом давлений. Таким образом, считает автор, при колебаниях тела происходит непрерывный переход энергии из кинетической в потенциальную и обратно. В результате, в аппарате Д. С. Добровольского происходит фибрирование и расщепление пучков волокон при незначительном укорочении.

Вместе с тем, другие исследователи [6; 8] не согласны с мнением автора [13] о преобладающей роли акустических колебаний в процессе размолы. Л. А. Серова [23] предполагает, что в акустическом аппарате имеют место ряд факторов, влияющих на процесс размолы: механический удар волокон о рабочие органы, ударная волна, ультразвуковые волны, кавитация, которую вызывают ультразвуковые волны и другие.

Авторы [6] считали, что размол в акустических аппаратах происходит за счет возникновения ультразвуковой кавитации, которая является основной причиной обработки материалов в жидкости при их облучении ультразвуком. По их мнению, все другие механизмы акустического воздействия малоэффективны.

Как утверждают Г. Л. Долгий и Л. Е. Аким [24], кавитация в такого рода аппаратах сильно развита лишь в области, прилегающей к поверхности ультразвукового излучателя, вызывая его интенсивную эрозию. С удалением от излучателя, эффект кавитации снижается. Кроме того, эффект кавитации становится менее эффективен с увеличением концентрации массы. Для повышения эффективности работы ультразвуковой установки необходимо суспензию разбавлять до концентрации 0,5–0,1 %, а это, в свою очередь, значительно снижает и так достаточно низкий коэффициент полезного действия аппарата.

Ю. П. Лосева [25] также утверждает, что в настоящее время акустический способ не нашел широкого применения в промышленности из-за высоких энергозатрат и значительно низкого коэффициента полезного действия. Вместе с тем автор [25] высказывает мнение о том, что подобные аппараты целесообразно использовать для роспуска волокнистых материалов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Безножевые аппараты «струя-преграда» занимают значительное место при исследованиях оптимальных условий процесса разработки волокнистой суспензии для получения качественных видов бумаг. Как считают исследователи [3; 13; 26; 27], в подобных аппаратах получается масса с более разработанными волокнами без значительного их укорочения. Большая работа в этом направлении была проделана нашим соотечественником В. Г. Марковым [27]. Он создал специальную установку для размола волокнистой массы безножевым способом. В этой установке волокнистая масса концентрацией от 1,5 до 1,8 % подавалась через насадку на преграду. Автор [27] при исследовании оптимальных условий размола использовал преграды различной формы и конфигурации.

В результате проведенных исследований В. Г. Марков сделал следующие выводы:

- гидроразмолом можно добиться любой степени помола;
- в результате размола наблюдается незначительное укорочение волокон по длине.

Прочностные характеристики бумаги, полученной из волокнистой массы после разработки ее в аппарате В. Г. Маркова, выше, чем у бумаги, полученной из массы, разработанной на ножевой размольной машине. Расход электроэнергии на порядок выше, чем в роллах. Для повышения эффективности процесса размола необходимо проводить размол массы высокой концентрации. В. Г. Марков [27] считал, что определяющим фактором процесса размола в его установке является обтекание струей внутренней поверхности сопла и поверхности преграды.

В работах В. Г. Маркова [27] и Х. Швальбе [26] анализируются исследования, проводимые различными авторами в этом направлении. В частности, описывается американский аппарат Стоби. В этом аппарате масса концентрацией 2–2,5 % выбрасывалась насосом под давлением 0,5–0,9 МН/м² и ударялась

о плиту с бороздками, установленную под углом 45 градусов.

Оригинальным способом размола в этом плане является способ Беккер–Партигтона, описанный в работах [26; 27]. Автор этого способа использовал взаимодействие встречных струй. При этом волокна одной струи обстреливаются волокнами другой, и за счет этого осуществляется размол. Бумага, отлитая из волокон, разработанных этим способом, оказалась значительно прочнее, нежели бумага, полученная из волокон ножевого размола [9].

При всех положительных особенностях такого рода аппаратов все они имели существенный недостаток, не позволивший им найти широкое использование в промышленности. Этим недостатком является большой расход электроэнергии, который на порядок и более превосходил традиционные ножевые способы размола. Основной причиной такого положения дел явилась недостаточная изученность механизма разработки волокон в этих аппаратах и невозможность, в связи с этим, оптимизации процесса. Учитывая, что в этих установках процесс размола зависит от многих факторов, среди которых определяющими являются скорость истечения струи, форма и характер преграды и другие, небезынтересным будет анализ работ, исследующих истечение жидкости через сопло для размыва и разрушения горных пород гидромониторами [28–30]. Все струи по величине напора подразделяются на низкие до 1,0 МН/м², средние (от 1,0 до 4,0 МН/м²) и высокие (выше 4,0 МН/м²).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

При изучении истечения жидкости из сопла при различных параметрах [28–31] авторами было установлено, что струю, вытекающую под давлением из сопла можно разбить на три участка (рис. 1).

Первый участок характеризуется высоким удельным давлением и плотностью. При переходе ко второму участку сила удара струи медленно уменьшается, и на третьем участке происходит интенсивное уменьшение силы удара до нуля. По мнению Р. Р. Чугуева [32], струю можно разбить на компактную, частично раздробленную и распыленную. Компактную часть струи во многих источниках [33–35] называют начальным участком струи ℓ_H . В его пределах осевые динамические давления остаются неизменными и равными исходному давлению. Используя расчетную схему (рис. 2) и уравнение количества движения для установившегося потока [32], автор предлагает формулу для определения силы удара горизонтальной струи о преграду

$$P_0 = \gamma \frac{u^2 \pi d_0^2}{g \cdot 4}, \quad (1)$$

где γ – удельный вес жидкости, Н/м³; u – скорость истечения струи, м/с; d_0 – диаметр выходного сечения насадки, м; g – ускорение свободного падения, 9,81 м/с².

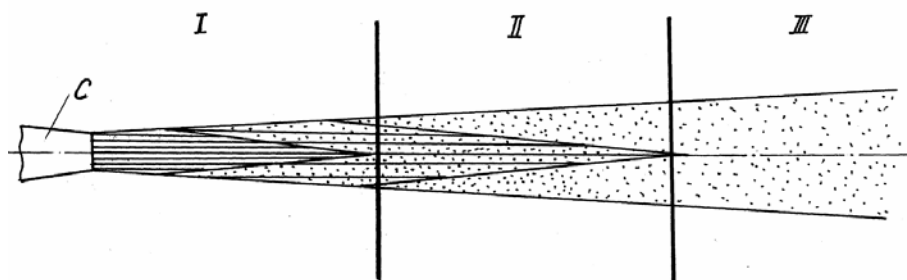


Рис. 1. Схема незатопленной свободной струи:

С – сопло; I – компактная часть; II – частично-раздробленная часть; III – распыленная часть

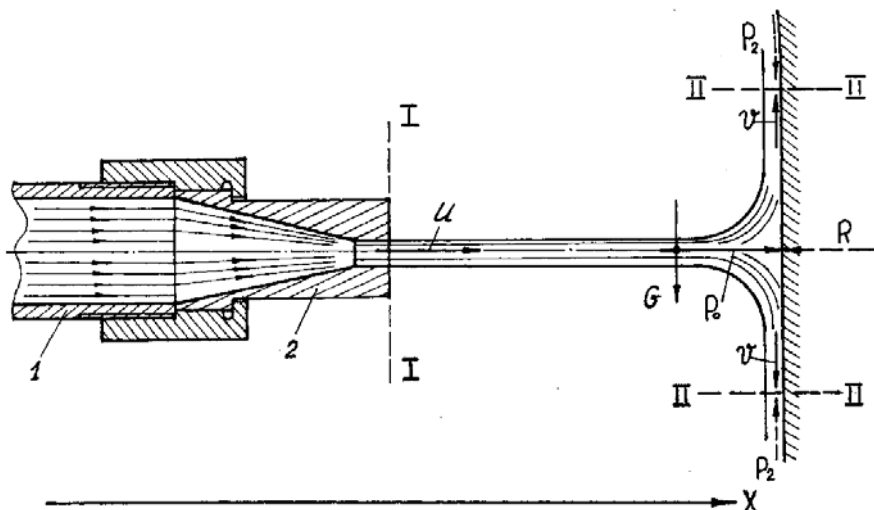


Рис. 2. Расчетная схема определения силы удара горизонтальной струи о преграду

При ℓ/d_0 до 150 сила удара струи практически не меняется [30], т. е.

$$\frac{P_0}{P_{\max}} = 1,$$

где ℓ – расстояние от сопла до преграды, м; $P_{\max}$ – максимальная сила удара струи в месте контакта с преградой.

Для этого случая приемлема формула (1).

Важным параметром при расчетах высоконапорных тонких струй является диаметр места контакта струи с преградой D . В соответствии с работами [35] диаметр пятна контакта струи с преградой может быть определен из выражения

$$\frac{D}{d_0} - 1 = A_1 \left(\frac{\ell}{d_0} \right)^k, \quad (2)$$

где A_1 – безразмерный параметр, зависящий от диаметра насадки; k – величина постоянная, полученная экспериментальным путем [35].

Анализ возможности разработки волокнистой суспензии за счет касательных усилий сдвига при радиальном растекании ее по вертикальной преграде, а также за счет турбулизации потока суспензии требует рассмотреть работы в этом направлении. Если для узких каналов (отверстие сопла) при любых практических скоростях жидкости можно использовать

закон Гагена–Пуазейля, то для широких каналов и, в частности, при обтекании жидкостью плоской пластины этот закон не приемлем, так как в данном случае на процесс течения жидкости начинает оказывать существенное влияние турбулентность.

При наличии турбулентности частицы жидкости в потоке, в отличие от ламинарного режима течения, начинают двигаться совершенно неупорядоченно и по самым извилистым траекториям.

По Л. Прандтлю [36] турбулентность в потоке является следствием образования вторичного пограничного слоя в непосредственной близости от стенки при волнообразных колебаниях основного пограничного слоя с большим числом Рейнольдса Re .

Периодические утолщения и утоньшения вторичного пограничного слоя приводят к образованию поля скоростей перпендикулярных к пластине.

Это поле проникает глубоко внутрь жидкости и вследствие сдвига фаз передает энергию из основного потока в первичный пограничный слой.

Следовательно, турбулентность возникает, как правило, из пограничного слоя. Колебания, возросшие в пограничном слое, приводят к S-образному профилю скоростей, пограничный слой начинает быстро свертываться в вихри. После того, как турбулентность однажды возникла в каком-либо месте потока, она сама собой распространяется дальше, при этом позади первых вихрей, уходящих вниз по течению, образуются все новые и новые вихри.

Перенос количества движения, вызванный пульсациями, создает дополнительные касательные напряжения [36]

$$\tau' = -\rho \overline{u'v'}, \quad (3)$$

где u' и v' – отклонения составляющих u и v от их средних по времени значений $\bar{u}$ и $\bar{v}$.

Произведя ряд математических преобразований [36–38] с учетом необходимых допущений и используя уравнение импульсов в случае турбулентного слоя [60] получим

$$\tau' = \frac{C \cdot f_0 (\rho \cdot u^2)}{2}. \quad (4)$$

Воспользовавшись эмпирическим степенным законом сопротивления [16], связывающим безразмерное трение $\tau' / (\rho u^2)$ с местным реинольдовским числом Re и произведя необходимые преобразования, можно получить окончательный вид формулы местного коэффициента трения

$$Cf_0 = 0,0263 Re_x^{-1/7}. \quad (5)$$

Зная местный коэффициент трения Cf_0 можно получить выражение полного коэффициента сопротивления пластины длиной L [37].

Из работ О. А. Терентьева [39] известно, что при больших градиентах скоростей волокнистая суспензия концентрацией до (4÷5 %) близка по своим характеристикам ньютоновской жидкости.

Основываясь на расчетной схеме (рис. 2), сделаем следующие допущения:

- в движении находится цилиндрический столб водной суспензии с равномерно распределенным в нем волокнистым материалом;
- струя имеет в сечении круг радиусом r_0 ;
- скорость струи перед контактом ее с преградой равна u .

Условно не будем учитывать следующие параметры:

- силу тяжести;
- вязкость жидкости;
- поверхностное натяжение;
- атмосферное давление.

Существуют две методики расчета силы воздействия струи суспензии на преграду при их контакте и последующем непрерывном истечении струи.

Согласно первой методике, используя расчетную схему (рис. 2) и уравнение количества движения, определим искомую силу согласно выражению (1).

Для подтверждения правильности расчетов по определению сил воздействия на отдельное волокно целлюлозной массы при контакте струи суспензии с преградой, воспользуемся несколько другой методикой расчетов, рассматривая непрерывную горизонтальную струю, контактирующую с неподвижной плоской преградой и растекающуюся во все стороны в виде диска, толщина которого уменьшается от середины к краям, предполагаем, как и в первом случае, что:

- струя имеет в сечении круг радиусом r_0 ;
- скорость струи перед контактом ее с преградой равна u .

Не будем учитывать при решении задачи следующие параметры: силу тяжести; вязкость суспензии; поверхностное натяжение суспензии; атмосферное давление, поскольку их влияние на исходный результат незначительно. Струя воды, набегающая на преграду, изменяет свой импульс. Поэтому, прежде всего, определим величину изменения импульса жидкости массы m , если в течение времени Δt на него действует сила $P_{\max}$. Из второго закона Ньютона [39], ускорение тела равно

$$a = \frac{P_{\max}}{m}. \quad (6)$$

Изменение скорости за время t равно

$$\frac{P_{\max} \Delta t}{m}. \quad (7)$$

Соответствующее изменение импульса

$$\Delta p = m \Delta u = P_{\max} \Delta t. \quad (8)$$

Сила $P_{\max}$, с которой преграда действует на струю воды, равна

$$P_{\max} = \frac{\Delta p}{\Delta t}. \quad (9)$$

Согласно третьему закону Ньютона, струя воды будет давить на преграду с силой $P_{\max}$.

Если считать, что после контакта с плоской преградой во все стороны плоскости растекается одинаковое количество суспензии с одинаковой скоростью, то суммарный импульс растекающейся жидкости после взаимодействия струи с преградой будет равен нулю, так как тогда струя теряет весь свой импульс. Следовательно, изменение импульса за время Δt равно импульсу, который струя переносит за это время, а поскольку скорость ее равна u , то

$$\Delta p = \Delta m u, \quad (10)$$

где Δm – часть массы суспензии, которая за время Δt вступает в соприкосновение с преградой.

За это время с преградой вступает во взаимодействие жидкость, составляющая часть струи со следующими геометрическими параметрами:

- длина $l = \Delta t u$;
- площадь поперечного сечения $S = \pi r_0^2$.

Часть массы струи

$$\Delta m = \rho \pi r_0^2 u \Delta t. \quad (11)$$

Из (10) получаем

$$\Delta p = \rho \pi r_0^2 u^2 \Delta t. \quad (12)$$

Тогда из (9) сила, с которой струя действует на преграду, равна

$$P_{\max} = \rho \pi u^2 r_0^2. \quad (13)$$

Разделив силу на площадь поперечного сечения струи, находим давление в месте контакта струи с преградой

$$P = \rho u^2. \quad (14)$$

Для сравнения количественных зависимостей сил, воздействующих на волокно рассчитанных по двум

представленным выше методикам, приведем конкретный пример расчета.

Примем по данным эксперимента:

- расстояние от насадки до преграды $l = 0,1$ м;
- диаметр выходного отверстия насадки $l_0 = 0,004$ м;
- объем рабочего цилиндра установки $V = 6 \cdot 10^{-3}$ м³;
- время истечения суспензии из рабочего цилиндра $t = 4$ с.

Скорость истечения струи суспензии из сопла определяется из выражения:

$$U = \frac{Q}{F}, \quad (15)$$

где Q – расход волокнистой суспензии через сечение сопла, м³/с; F – площадь поперечного сечения сопла, м².

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{6 \cdot 10^{-3}}{4} = 1,5 \cdot 10^{-3}, \text{ м}^3/\text{с};$$

$$F = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,004^2}{4} = 12,57 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2.$$

Тогда

$$u = \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{12,57 \cdot 10^{-6}} = 119,332 \text{ м/с}.$$

Подставляя значения полученной скорости в выражение (1) получим

$$P_{\max} = 1054 \frac{119,332^2 \cdot 3,14 \cdot 0,004^2}{4} = 188,61 \text{ Н}.$$

Согласно второй методике расчета для определения силы, действующей на волокно при контакте струи с преградой и последующем непрерывном истечении струи, воспользуемся выражением (13):

$$P_{\max} = 1054 \cdot 3,14 \cdot 119,332^2 \cdot 0,002^2 = 188,61 \text{ Н}.$$

Таким образом, величина усилий, развиваемых в момент контакта струи с преградой, рассчитанная по различным методикам, имеет одинаковые значения. Эти усилия по своей величине недостаточны для разрушения волокна.

При мгновенном контакте с неподвижной преградой налетающей струи, кроме физических явлений, описанных выше, имеет место процесс удара (рис. 2), сопровождающийся явлением, влекущим за собой ударную волну. Она проявляется при условии [1], когда скорость струи

$$u_{\text{уд}} = \frac{\lambda}{\eta}, \quad (16)$$

где λ – коэффициент поверхностного натяжения суспензии; η – коэффициент динамической вязкости суспензии.

При нормальных условиях для воды $\lambda = 73$ МН/м; $\eta = 1$ МН·с/м²

Тогда, в соответствии с [28] наименьшая скорость струи, при которой в момент контакта с неподвижной преградой в полной мере возникает гидравлический удар, с сопутствующей этому явлению ударной волной, равна

$$u_{\text{уд}} = \frac{73}{1} = 73, \text{ м/с}.$$

При $u_{\text{уд}} < 73$ м/с гидравлического удара в полной мере не происходит, потому что время деформирования струи меньше времени, в течение которого распространяется ударная волна по всей ее длине.

То есть, часть кинетической энергии, выделяющейся в момент удара, расходуется на деформирование (сплющивание) струи. Таким образом, прежние представления об ударе струи о преграду можно назвать условным ударом.

Рассмотрим, что происходит при мгновенном возникновении контакта между фронтом нагнетающей струи и неподвижной преградой. Попробуем вычислить давление на преграду в этом случае, как и в предыдущих примерах, считаем, что:

- струя имеет в сечении круг радиусом r_0 ;
- скорость струи перед ударом о стену равна u .
- в движении находится цилиндрический столб водной суспензии с равномерно распределенным в нем волокнистым материалом.

При решении задачи не учитываются, следующие параметры: сила тяжести; вязкость жидкости; поверхностное натяжение; атмосферное давление.

В момент удара тонкий слой суспензии, вступающий в контакт с преградой, останавливается. Скорость суспензии в этом слое становится равной нулю, и он препятствует продвижению остальной массы цилиндрического столба суспензии, то есть сам слой суспензии становится препятствием. Об него тормозится следующий слой, также становящийся преградой и так далее. Возникает ударная волна, то есть вдоль цилиндрического столба суспензии от преграды начинает распространяться волна, которая разделяет уже остановившиеся слои от еще неостановившихся слоев. Скорость движения этой волны равна скорости звука в воде, то есть приблизительно $u_{\text{зв}} = 1500$ м/с [40].

За время Δt скорость той массы, которая находится в цилиндре высотой $u_{\text{зв}} \Delta t$, упадет до нуля.

Согласно выражению (1) (только с заменой u на $u_{\text{зв}}$), получаем формулу для нахождения давления в случае удара струи о преграду

$$P_{\text{уд}} = \rho u_{\text{зв}} u, \quad (17)$$

где ρ – плотность воды; u – скорость струи; $u_{\text{зв}}$ – скорость звука в воде.

При использовании уравнения (16), мы говорим об истинном ударе, который подчиняется зависимости (17).

При скоростях струи $u_{\text{уд}} \leq 73$ м/с гидравлический удар, пусть и не в полной мере, но все же происходит, и часть кинетической энергии трансформируется в ударное воздействие и в ударную волну.

Давление в месте контакта струи с преградой, при ударе и при истечении, были вычислены в диапазоне скоростей от 1 м/с до сверхзвуковых.

На основе полученных данных (табл. 1) был построен график зависимости давления от скорости истечения струи (рис. 3).

Полученные расчетные данные позволяют провести сопоставительный и при истечении струи в месте ее сопряжения с подвижной преградой, анализ силовых факторов для процессов, происходящих при ударе.

Рассматривая зависимость величины давления, развивающегося при взаимодействии непрерывно истекающей струи (второй этап) с неподвижной преградой, можно сделать вывод, что при значениях скоростей струи, ниже до 75 м/с, интенсификации гидродинамического воздействия на волокно, распределен-

ное в струе, не происходит, то есть для разработки волокон данных величин давления недостаточно.

При ударе о преграду, при таких же скоростях струи, воздействие на волокно существенно увеличивается и величины давления уже, превышают предел прочности волокна, что приводит к локальным нарушениям его структуры.

Таблица 1

Значения расчетных давлений при различных скоростях истечения струи

Истечение		Удар		Отношение
u , м/с	P , МПа	u , м/с	$P_{уд}$, МПа	$P_{уд}/P$
1	0,001	1	1,5	1500,00
5	0,025	5	7,5	300,00
10	0,1	10	15	150,00
15	0,225	15	22,5	100,00
20	0,4	20	30	75,00
30	0,9	30	45	50,00
40	1,6	40	60	37,50
50	2,5	50	75	30,00
60	3,6	60	90	25,00
70	4,9	70	105	21,43
80	6,4	80	120	18,75
90	8,1	90	135	16,67
100	10	100	150	15,00
110	12,1	110	165	13,64
120	14,4	120	180	12,50
130	16,9	130	195	11,54
140	19,6	140	210	10,71
150	22,5	150	225	10,00
300	90	300	450	5,00
450	202,5	450	675	3,33
600	360	600	900	2,50
750	562,5	750	1125	2,00
900	810	900	1350	1,67
1050	1102,5	1050	1575	1,43
1200	1440	1200	1800	1,25
1350	1822,5	1350	2025	1,11
1500	2250	1500	2250	1,00
1650	2722,5	1650	2475	0,91

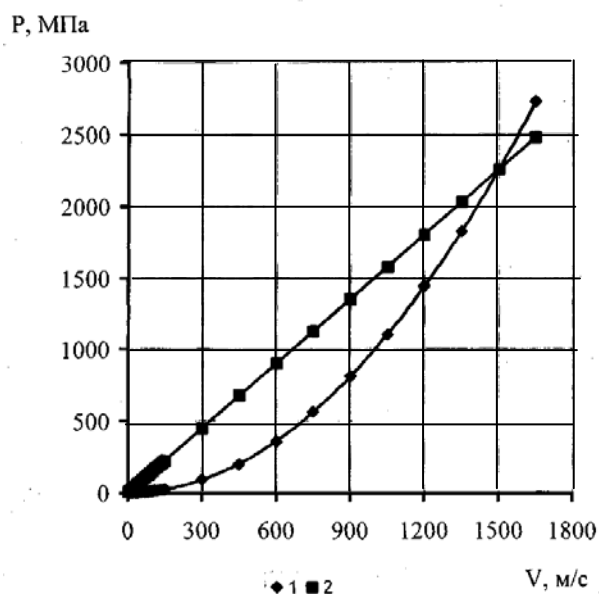


Рис. 3. Зависимость давления от скорости истечения:

1 – давление струи при ударе; 2 – давление струи при истечении

Сравним работу струи по потере импульса силы, при контакте с преградой. Если при непрерывном истечении струя суспензии за время Δt теряет импульс в цилиндре высотой $h = u \Delta t$, то при внезапном ударе о стенку, за время Δt теряется импульс в цилиндре высотой $H = u_{зв} \Delta t$, то есть в значительно большей массе суспензии.

Следовательно, развиваемое давление в месте контакта струи с преградой при ударе будет значительно выше, чем при истечении.

Это давление больше давления непрерывно истекающей струи, имеющей ту же скорость, на величину, равную

$$\frac{P_{уд}}{P} = \frac{u_{зв}}{u}. \quad (27)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, оценка силовых факторов, возникающих в месте контакта струи с преградой показала, что при внезапном ударе струи за единицу времени теряется значительно больший импульс, нежели при непрерывном истечении, т.е. в значительно большей массе суспензии. Соответственно и развиваемое давление, и плотность энергии (энергия единицы объема жидкости) в первом случае должны быть так же значительно выше [36].

Однако время, в течение которого на волокно действует импульсная нагрузка при ударе струи о преграду, ничтожно мало по сравнению с временем истечения. Этим объясняется незначительное действие на волокно сил, возникающих в месте контакта струи с преградой, хотя, как отмечалось выше, фибрилляция все же имела место за счет наличия кавитационного эффекта.

Исследования, проведенные на установке для измельчения волокнистого материала, показали, что уже при сравнительно не высоких скоростях струи, в момент удара ее о преграду, в стенках волокон появляется напряжение, превышающее предел его прочности.

Однако наличие опасных напряжений в том или ином месте стенки означает лишь то, что разрушения структуры возможны именно в этих локальных точках, но не гарантированы по всей длине волокон. [36].

Глубокая же степень разработки, в конечном счете, зависит от энергии удара, т.е. от скорости струи и числа ее соударений о преграду. Повышение скорости струи обычными способами связано со значительными энергозатратами и конструктивными усложнениями.

Вышеуказанные гидродинамические воздействия на волокнистую суспензию при размоле можно объяснить не только для установок безножевого размола, но они также правомерны для ножевых размольных машин, поскольку в них наблюдаются ударные воздействия волокнистой суспензии на рабочие органы ножевых гарнитур и на внутренние поверхности статора и ротора.

Более предпочтительным представляется возможность трансформирования малоскоростной струи в высокоскоростную, при малых энергозатратах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выяснено, что при размоле волокнистых полуфабрикатов в технологии производства продукции ЦБП серьезную роль играет гидродинамическое воздействие в зоне размола, независимо от конструкции размольных установок, использующих ножевой и безножевой способы.

Одним из важных элементов гидродинамического воздействия на волокно при размоле волокнистых полуфабрикатов является удар волокнистой суспензии о неподвижную преграду при течении её струи в зоне размола.

Произведен анализ и получены расчеты скорости течения волокнистой суспензии и величины силы удара её струи о неподвижную преграду.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Гегузин Я. Е. Капля. М. : Наука, 1977. С. 54–58.
2. А.с. 1694748 СССР. Гидродинамический способ размола волокнистых материалов / Ю. Д. Алашкевич, Н. А. Войнов, А. Г. Лахно, Е. К. Тихонович. Бюл. 1992. № 44.
3. Корда И., Либнар З., Прокоп И. Аппараты, в которых гидродинамические пульсации давления создаются при помощи концентрических выступов (зубьев) // Размол бумажной массы. М. : Лесн. пром-сть, 1967. С. 256–260.
4. Iaymc G. Neue Beitrage zur Theorie der Entstehung der Blattgestigkeit // Das Papier. 1961. № 100. S. 581–600.
5. Brecht W., Mikleu G. Eignungsuntersuchng eine Maschine zur Entstippung von Halbstoffen // Das Papier. 1960. № 2. S 52–57; № 3. S. 91–96.
6. Гончаров В. Н., Гаузе А. А., Аликин В. П. Машины для роспуска и безножевого размола бумажной массы : учебное пособие. Л., 1979. 78 с.
7. Овсенко Ю. Г. О движении вязкой жидкости между двумя вращающимися сферами // Журн. прикл. механики и техн. физики. 1974. № 3. С. 179–180.
8. Перник А. Д. Проблемы кавитации. Л. : Судостроение, 1966. 439 с.
9. Пашинский В. Ф. Машины для размола волокнистой массы. М., 1972. 160 с.
10. Метелкин А. Ф., Матюшин Л. Ю. Влияние температуры на интенсивность процесса ультразвуковой очистки в жидкой среде // Ультразвуковая техника. М. : НИИМаш, 1968. Вып. 3. С. 48–55.
11. Сиротюк М. Г. Ультразвуковая кавитация // Акустический журн. 1962. Вып. 3. С. 255–272.
12. Шемякин Э. В., Гончаров В. Н. Роль парогазовых пузырьков в размоле целлюлозных волокон // Тр. ЛТИ ЦБП. Л., 1970. Вып. 27. С. 138–141.
13. Добровольский Д. С. Акустический способ размола. Красноярск, 1961. 45 с.
14. А.с. 283823 СССР. Кавитационный аппарат для размола массы / Б. С. Петров, М. И. Леонидов. Бюл. 1970. № 31.
15. А.с. 421726 СССР. Устройство для размола волокнистой массы / Э. В. Шемякин. Бюл. 1974. № 12.
16. А.с. 268162 СССР. Способ размола волокнистых материалов / Р. А. Солоницын, Л. А. Горбачев. Бюл. 1970. № 13.

17. А.с. 393382 СССР. Устройство для обработки волокнистой массы / Р. А. Солоницын, Л. А. Горбачев, Ю. В. Козулин, Н. П. Зотин, Г. А. Воробьев и А. В. Ефимов. Бюл. 1973. № 33.

18. А.с. 572545 СССР. Установка для размолки волокнистых материалов / Р. А. Солоницын, Л. А. Горбачев, Ю. В. Козулин, Н. П. Зотин. Бюл. 1977. № 34.

19. Janowski W. Pahlman R. Schall-und Ultraschall-erzeugung in Flussigkeiten fur industrielle Zwecke // Zeitschrift an der Physik. 1948. Heft 1. S. 222–228.

20. Hartmann J. Construction Performance and Design of the Acoustic Air-jet Generator // Journal Sci Instr.-1933.-Vol. 16. – P. 116–121.

21. Hagedorn H. Hydroulisches Beschallungsgerat fur Schall-Ultraschallwindung Filgew Maschinenbau // Veb. verlag Technik. 1954. Haft 4. S. 122–128.

22. Jagoda M. a Slavik J. Modifikace Hartmanove zwukoveho generatoru Mat-fis // Casopic. 1957. Rocnik 7. № 1. S. 63–66.

23. Серова Л. А. Влияние ультразвука на процесс размолки волокнистых материалов // Оборудование для размолки. М. : ЦНИИТЭИлеспром, 1965. С. 21–30.

24. Долгин Г. Л., Аким Л. Е. К вопросу о размолке сульфитной вискозной целлюлозы ультразвуком // Тр. ЛТИ ЦБП. 1965. Вып. 17. С. 59–61.

25. Лосева Ю. П. Использование электрогидравлического эффекта в бумажной промышленности // Бум. пром-сть. 1957. № 9. С. 8–9.

26. Швальбе Х. Приготовление бумажной массы. М. : Гослесбумиздат, 1935. С. 76–77.

27. Марков В. Г. Исследование гидравлического размолки массы : дис. ...канд. техн. наук. Л. : ЛТА, 1949. 213 с.

28. Верещагин А. Ф., Семерчан А. А., Филлер Ф. М. Некоторые исследования струи воды, вытекающей из сопла под давлением до 2000 атм // Изв. АН СССР. ОТТИ. 1957. № 1. С. 57–61.

29. Лышевский А. С. Определение силы удара гидромониторной струи о препятствия // Изв. вузов. Горн. журн. 1963. № 7. С. 29–37.

30. Нурок Г. А. Гидромеханизация открытых горных разработок. М. : Недра, 1970. 584 с.

31. Гавырин Г. П. Исследование гидромониторных струй // Изв. АН СССР. ОТН. 1939. № 7. С. 25–44.

32. Чугуев Р. Р. Гидравлика. Л. : Энергия, 1982. 672 с.

33. Штукатуров К. М., Куилин И. С. Влияние начального диаметра и напора струи на ее качество // Тр. ин-та горного дела АН СССР. Уральский фил. 1963. Вып. 3. С. 83–86.

34. Асатур К. Г. Гидравлический расчет гидроотбойки горных пород // Изв. вузов. Горн. журн. 1963. № 7. С. 23–28.

35. Никонов Г. П., Шавловский С. С., Хныкин В. Ф. Исследование динамики и структуры тонких струй воды давлением до 500 атм / ИГД им. Скопинского. М., 1969. 38 с.

36. Прандтль Л. Гидромеханика. М. : Иностран. лит., 1951. 575 с.

37. Лойцанский Л. Г. Механика жидкости и газа. М. : Наука, 1970. 898 с.

38. Falkner V.M. The resistance of a smooth plate with turbulent boundary layer // Aircraft Engineering. 1943. № 15. P. 65–72.

39. Терентьев О. А. Гидродинамика волокнистых суспензий в целлюлозно-бумажном производстве. М. : Лесн. пром-сть, 1980. 248 с.

40. Хилькевич С. С. Физика вокруг нас. М. : Наука, 1985. С. 83–87.

REFERENCES

1. Geguzin Ya. E. Kaplya. M. : Nauka, 1977. S. 54–58.

2. А.с. 1694748 СССР. Гидродинамический способ размолки волокнистых материалов / Ю. Д. Алашкевич, Н. А. Войнов, А. Г. Лахно, Е. К. Тихонович. Бюл. 1992. № 44.

3. Korda I., Libnar Z., Prokop I. Apparaty, v kotoryh gidrodinamicheskie pul'sacii davleniya sozdayutsya pri pomoshchi koncentricheskikh vystupov (zub'ev) // Razmol bumazhnoj massy. M. : Lesn. prom-st', 1967. S. 256–260.

4. Iaymc G. Neue Beitrage zur Theorie der Entstehung der Blattgestigkeit // Das Papier. 1961. № 100. S. 581–600.

5. Brecht W., Mikleu G. Eignungsuntersuchung eine Maschine zur Entstippung von Halbstoffen // Das Papier. 1960. № 2. S. 52–57; № 3. S. 91–96.

6. Goncharov V. N., Gauze A. A., Alikin V. P. Mashiny dlya rospuska i bezhnozhevogo rozmola bumazhnoj massy : uchebnoe posobie. L., 1979. 78 s.

7. Ovseenko Yu. G. O dvizhenii vyazkoj zhidkosti mezhdvumy vrashchayushchimisya sferami // Zhurn. prikl. mekhaniki i tekhn. fiziki. 1974. № 3. S. 179–180.

8. Pernik A. D. Problemy kavitacii. L. : Sudostroenie, 1966. 439 s.

9. Pashinskij V. F. Mashiny dlya rozmola voloknistoj massy. M., 1972. 160 s.

10. Metelkin A. F., Matyushin L. Yu. Vliyanie temperatury na intensivnost' processa ul'trazvukovoj ochistki v zhidkoj srede // Ul'trazvukovaya tekhnika. M. : NIIMash, 1968. Vyp. 3. S. 48–55.

11. Sirotjuk M. G. Ul'trazvukovaya kavitaciya // Akusticheskij zhurn. 1962. Vyp. 3. S. 255–272.

12. Shemyakin E. V., Goncharov V. N. Rol' parogazovykh puzyr'kov v razmole celluloznykh volokon // Tr. LTI CBP. L., 1970. Vyp. 27. S. 138–141.

13. Dobrovol'skij D. S. Akusticheskij sposob rozmola. Krasnoyarsk, 1961. 45 s.

14. А.с. 283823 СССР. Кавитационный аппарат для размолки массы / В. С. Петров, М. И. Леонидов. Бюл. 1970. № 31.

15. А.с. 421726 СССР. Устройство для размолки волокнистой массы / Е. В. Шемыкин. Бюл. 1974. № 12.

16. А.с. 268162 СССР. Способ размолки волокнистых материалов / Р. А. Солоницын, Л. А. Горбачев. Бюл. 1970. № 13.

17. А.с. 393382 СССР. Устройство для обработки волокнистой массы / Р. А. Солоницын, Л. А. Горбачев, Ю. В. Козулин, Н. П. Зотин, Г. А. Воробьев и А. В. Ефимов. Бюл. 1973. № 33.

18. А.с. 572545 СССР. Установка для размолки волокнистых материалов / Р. А. Солоницын, Л. А. Горбачев, Ю. В. Козулин, Н. П. Зотин. Бюл. 1977. № 34.

19. Janowski W. Pahlman R. Schall-und Ultraschall-erzeugung in Flüssigkeiten für industrielle Zwecke // Zeitschrift an der Physik. 1948. Heft 1. S. 222–228.
20. Hartmann J. Construction Performance and Design of the Acoustic Air-jet Generator // Journal Sci Instr., 1933. Vol. 16. P. 116–121.
21. Hagedorn H. Hydroulisches Beschallungsgerät für Schall-Ultraschallwindung Filgew Maschinenbau // Veb. verlag Technik. 1954. Haft 4. S. 122–128.
22. Jagoda M. a Slavik J. Modifikace Hartmanove zvukoveho generatoru Mat-fis // Casopis. 1957. Rocnik 7. № 1. S. 63–66.
23. Serova L. A. Vliyanie ul'trazvuka na process razmola voloknistykh materialov // Oborudovanie dlya razmola. M. : CNIITEllesprom, 1965. S. 21–30.
24. Dolgin G. L., Akim L. E. K voprosu o razmole sul'fitnoj viskoznoj cellyulozy ul'trazvukom // Tr. LTI CBP. 1965. Vyp. 17. S. 59–61.
25. Loseva Yu. P. Ispol'zovanie elektrogidravlicheskogo effekta v bumazhnoj promyshlennosti // Bum. prom-st'. 1957. № 9. S. 8–9.
26. Shval'be H. Prigotovlenie bumazhnoj massy. M. : Goslesbumizdat, 1935. S. 76–77.
27. Markov V. G. Issledovanie gidravlicheskogo razmola massy : dis. ... kand. tekhn. nauk. L. : LTA, 1949. 213 s.
28. Vereshchagin A. F., Semerchan A. A., Filler F. M. Nekotorye issledovaniya strui vody, vytekayushchej iz sopla pod davleniem do 2000 atm // Izv. AN SSSR. OTTI. 1957. № 1. S. 57–61.
29. Lyshevskij A. S. Opredelenie sily udara gidromonitornoj strui o prepyatstviya // Izv. vuzov. Gorn. zhurn. 1963. № 7. S. 29–37.
30. Nurok G. A. Gidromekhanizatsiya otkrytykh gornykh razrabotok. M. : Nedra, 1970. 584 s.
31. Gavyrin G. P. Issledovanie gidromonitornykh struj // Izv. AN SSSR. OTN. 1939. № 7. S. 25–44.
32. Chuguev R. R. Gidravlika. L. : Energiya, 1982. 672 s.
33. Shtukaturov K. M., Kuilin I. S. Vliyanie nachal'nogo diametra i napora strui na ee kachestvo // Tr. in-ta gornogo dela AN SSSR. Ural'skij fil. 1963. Vyp. 3. S. 83–86.
34. Asatur K. G. Gidravlicheskij raschet gidrootbojki gornykh porod // Izv. vuzov. Gorn. zhurn. 1963. № 7. S. 23–28.
35. Nikonov G. P., Shavlovskij S. S., Hnykin V. F. Issledovanie dinamiki i struktury tonkikh struj vody davleniem do 500 atm / IGD im. Skochinskogo. M., 1969. 38 s.
36. Prandtl' L. Gidromekhanika. M. : Inostr. lit., 1951. 575 s.
37. Lojcanskij L. G. Mekhanika zhidkosti i gaza. M. : Nauka, 1970. 898 s.
38. Falkner V. M. The resistance of a smooth flate with turbulent boundary layer // Aircraft Engineering. 1943. № 15. P. 65–72.
39. Terent'ev O. A. Gidrodinamika voloknistykh suspenzij v cellyulozno-bumazhnom proizvodstve. M. : Lesn. prom-st', 1980. 248 s.
40. Hil'kevich S. S. Fizika vokrug nas. M. : Nauka, 1985. S. 83–87.

© Алашкевич Ю. Д., Ушаков А. В., 2025

Поступила в редакцию 19.05.2025
Принята к печати 04.08.2025

РАСТИТЕЛЬНЫЕ ОТХОДЫ КАК ИСТОЧНИК СЫРЬЯ ДЛЯ БИОТОПЛИВА

О. А. Есякова¹, Ж. А. Кох²

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: ¹olga-la83@mail.ru, ²jannetta-83@mail.ru

Аннотация. Перед человечеством всегда остро стоял вопрос поиска дешевых источников энергии, получение которых не требовало бы чрезмерных затрат. Большую часть 54–60 % биотоплива составляют его традиционные формы: дрова, растительные остатки и сушёный навоз для отопления домов и приготовления пищи. Топливо биологического происхождения классифицируется в зависимости от агрегатного состояния и по принадлежности сырья к одному из четырех поколений. Гидролизный лигнин, как любая органика, содержащая значительное количество кислорода, склонна к брожению независимо от условий хранения. Гидролизный лигнин характеризуется большим объемом пор, приближающимся к пористости древесного угля, высокой реакционной способностью по сравнению с традиционными углеродистыми восстановителями и в двое большим в сравнении с древесиной содержанием твердого углерода, достигающий 30 %, т. е. почти половины углерода древесного угля. Целью научного исследования являлась возможность переработки гидролизного лигнина с получением биотоплива. Пробы гидролизного лигнина (ГЛ) отбирали на промышленном шламоотвале на территории бывшего ООО «Канский БиоХимЗавод». Пробоотбор проводили в сухую погоду с соблюдением необходимых требований. Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что технический гидролизный лигнин является многокомпонентным соединением, включает собственно технический лигнин (60–70 %) и сопутствующие вещества: экстрактивные вещества (7–22 %), представленные (органическая часть) моносахаридами и продуктами их распада, терпеновыми углеводородами и их кислородсодержащими производными, ароматическими соединениями, алифатическими углеводородами, высокомолекулярными кислотами; остаточные полисахариды (2–8 %). Предложен способ переработки гидролизного лигнина из отходов Канского биохимического завода, благодаря которому возможно снизить антропогенную нагрузку на атмосферный воздух, почву ликвидацией хранилища, с получением альтернативного биотоплива.

Ключевые слова: биотопливо, отходы, утилизация, технология, управление.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 4, P. 75–84

PLANT WASTE AS A SOURCE OF RAW MATERIALS FOR BIO FUEL

O. A. Esyakova¹, Zh. A. Kokh²

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: koh_za@sibsau.ru

Annotation. Humanity has always faced the challenge of finding cheap energy sources that do not require excessive costs. Traditional forms of biofuels, such as firewood, plant residues, and dried manure, account for the majority (54–60 %) and are used for home heating and cooking. Biofuels are classified by their physical state and the generation of their raw materials. Hydrolysis lignin, like any organic matter containing significant oxygen, is prone to fermentation regardless of storage conditions. Hydrolysis lignin is characterized by a large pore volume, approaching the porosity of charcoal, high reactivity compared to traditional carbonaceous reducing agents, and twice the solid carbon content compared to wood, reaching 30 %, which is almost half the carbon content of charcoal. The aim of the scientific research was the possibility of processing hydrolysis lignin to produce biofuel. Hydrolysis lignin (HL) samples were taken from an industrial sludge dump on the territory of the former Kansky BioChemFactory LLC. Sampling was carried out in dry weather in compliance with the necessary requirements. The studies allow us to conclude that technical hydrolysis lignin is a multicomponent compound, including technical lignin (60–70 %) and related substances: extractives (7–22 %), represented (organic part) by monosaccharides and their decomposition products, terpene hydrocarbons and their oxygen-containing derivatives, aromatic compounds, aliphatic hydrocarbons, high-molecular-weight acids; residual polysaccharides (2–8 %). A method for processing hydrolysis lignin from the dumps of the Kansky Biochemical Plant is proposed, which makes it possible to reduce the anthropogenic load on the atmospheric air and soil by eliminating the storage facility, while obtaining alternative biofuel.

Keywords: bio fuel, waste, recycling, technology, management.

ВВЕДЕНИЕ

Быстрый рост населения, улучшение экономической деятельности, социально-культурные тенденции и индустриализация вызвали резкий всплеск потребления энергии в последние десятилетия. Перед человечеством всегда остро стоял вопрос поиска дешевых источников энергии, получение которых не требовало бы чрезмерных затрат. Проблема использования энергоносителей особенно обострилась в XX веке, когда стало ясно, что бездумное сжигание углеводов приведет к дальнейшему снижению их запасов. Ученые пришли к выводу, что запасы нефти и газа со временем иссякнут, а затраты на разработку новых месторождений существенно возрастут, поскольку придется привлекать больше техники и производственных мощностей [1; 2; 8; 14; 20; 22; 24]. В этот период значительно ухудшилась экологическая ситуация, болезненно реагирующая на исчезающий лесной покров и продолжающееся загрязнение атмосферы, недр и водных объектов. Возросла актуальность поиска альтернативных источников тепловой энергии, которые могли бы заменить природный газ и нефть. И таким эффективным направлением, наряду с солнечной энергетикой, ветроэнергетикой стало использование энергоносителей биологического происхождения (биотопливо) [21; 23; 25]. Под топливом биологического происхождения (биотопливом) следует понимать продукт, синтезируемый из животного, либо растительного сырья, а также из биологических отходов, которые при определенном воздействии, выделяют тепловую энергию (рис. 1).

Таким образом, под биотопливом можно понимать топливо, получаемое из биомассы в результате проведения термохимической или биологической реакции. Большую часть 54–60 % биотоплива составляют его традиционные формы: дрова, растительные остатки и сушёный навоз для отопления домов и приготовления пищи [3; 11]. Их используют приблизительно 38 %

населения Земли на сегодняшний день. Биотопливо согласно ГОСТ Р 52808–2007 «Нетрадиционные технологии. Энергетика биоотходов. Термины и определения» – это твердое, жидкое или газообразное топливо, получаемое из биомассы термохимическим или биологическим способом (рис. 2) [4; 9; 10; 15; 18].

Топливо биологического происхождения классифицируется в зависимости от агрегатного состояния и по принадлежности сырья к одному из четырех поколений. С учетом агрегатного состояния, топливо биологического происхождения может быть в жидком, твердом или газообразном состоянии. Наиболее распространенной формой биотоплива, безусловно, является твердая биомасса. Твердая масса представлена в виде топливных брикетов и гранул, горючего торфа, биоугля, древесной щепы и дров. Жидкое (моторное) топливо – продукт переработки растительного сырья, который обеспечивает работу двигателей внутреннего сгорания. Сюда относится: биоэтанол, биометанол, биодизель, биобутанол, бидиметилловый эфир. В газообразном состоянии биотопливо представлено биогазом, биометаном и биоводородом [25–30].

Месторождения ископаемых топлив рано или поздно будут исчерпаны или их разработка станет экономически нецелесообразной. В этой связи возрастает роль альтернативных возобновляемых источников органического сырья и энергии – биомассы. Наиболее перспективно лигноцеллюлозное сырьё. На гидролизных и биохимических заводах лигниновые отходы, как правило, вывозятся в отвалы и загрязняют большие территории. Запасы гидролизного лигнина в России составляют десятки миллионов тонн и сопоставимы с отходами лесопиления и деревообработки [5; 13; 16; 17; 19]. В отличие от древесных отходов, лигнин сконцентрирован в отвалах возле гидролизных заводов. Поскольку его утилизация не организована, актуальна проблема хранения и экологического загрязнения.

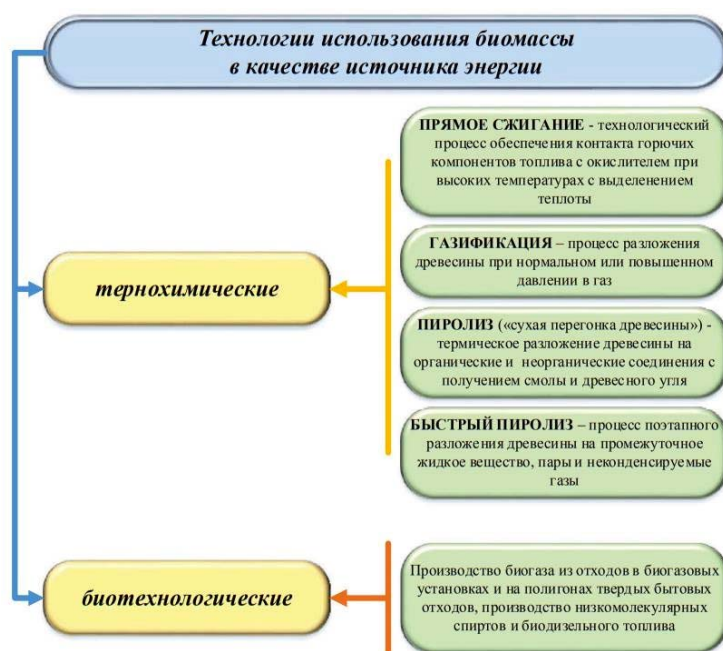


Рис. 1. Классификация технологий использования биомассы



Рис. 2. Классификация биотоплива по агрегатной форме

Гидролизный лигнин, как любая органика, содержащая значительное количество кислорода, склонна к брожению независимо от условий хранения. При сбраживании гидролизного лигнина образуются диоксид углерода, метан и выделяется тепловая энергия, что приводит к самопроизвольному возгоранию отходов. Гидролизный лигнин характеризуется большим объемом пор, приближающимся к пористости древесного угля, высокой реакционной способностью по сравнению с традиционными углеродистыми восстановителями и в двое большим в сравнении с древесиной содержанием твердого углерода, достигающий 30 %, т. е. почти половины углерода древесного угля.

Целью научного исследования являлась возможность переработки гидролизного лигнина с получением биотоплива.

Для ее достижения решались следующие задачи:

1. Изучение существующих технологий получения альтернативных источников энергии из растительного сырья.
2. Определение физико-химического состава образцов лигнина гидролизного.
3. Обоснование выбора оптимального способа получения топливных брикетов из лигнина.
4. Проведение экспериментальных исследований и обработка полученных результатов по разработанной технологии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пробы гидролизного лигнина (ГЛ) отбирали на промышленном шламоотвале на территории бывшего ООО «Канский БиоХимЗавод». Пробоотбор проводили в сухую погоду с соблюдением необходимых тре-

бований [6]. Для данных исследований были отвалы лигнина 40-летней давности. Пробоотбор осуществляли методом квартования в четырех различных точках с глубины 2 и 4 м шламоотвала. Всего было отобрано и исследовано 8 проб ГЛ. Общая схема исследования проб гидролизного лигнина представлена на рис. 3.

С помощью методов атомно-абсорбционной спектрофотометрии (ААС) и пиролитической хромато-масс-спектрометрии были определены составные компоненты лигнина и содержание в нем тяжелых металлов. ААС представляет собой элементный анализ вещества по атомным спектрам поглощения, которые наблюдаются при пропускании через атомный пар пробы видимого или УФ-излучения. В результате наблюдается переход электронов атомов с нижних энергетических уровней на возбужденные. Каждый переход в атомном спектре сопровождается резонансными линиями, характерными для того или иного элемента. Измерения в данном методе основаны на законе Бугера – Ламберта – Бера. Погрешность определения элементного состава с помощью ААС составляет около 2 %, чувствительность не менее 1 мкг/см^3 , в отдельных случаях до $0,005 \text{ мкг/см}^3$ [7]. Исследование состава ГЛ проводилось на атомно-абсорбционном спектрофотометре AA-630 «Shimadzu» (Япония), с использованием атомизации в пламени ацетилен-воздух. Обработка полученных данных осуществлялась с помощью программы Wizzard. Подготовка пробы к анализу заключалась в сжигании лигнина в муфельной печи при 500°C в течение 2 часов. Далее полученную золу растворяли в 58 %-й азотной кислоте и фильтровали. Полученный фильтрат вводили в инжектор атомно-абсорбционного спектрофотометра.



Рис. 3. Общая схема исследования проб гидролизного лигнина

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По химическому составу лигнин ближе всего к углеводам и отличается от них более высоким содержанием углерода. Элементный состав гидролизного лигнина и отвалов Канского биохимического завода представлен в табл. 1.

Дисперсность трудногидролизуемого лигнина (ТГЛ) зависит в основном от фракционного и ботанического состава перерабатываемого сырья. Она колеблется в пределах от нескольких сантиметров до нескольких микрометров. Более 60 % массы ТГЛ представляет фракция менее 1 мм (табл. 2).

Структурно-механические свойства ТГЛ существенно зависят от его влагосодержания, дисперсности, внешнего давления и других факторов. Под действием механических нагрузок происходит объемное уплотнение массы материала, увеличение числа контактов между частицами и в результате упрочнение его структурного каркаса. Наиболее существенным в процессе формирования ТГЛ является его влажность, что определяет давление прессования. Так, при гранулировании ТГЛ в фильерах, где развивается давление около 2,5–3,0 МПа, для создания максимально прочной структуры гранулы влажность должна составлять примерно 50 %, а при брикетировании на прессах высокого давления при 100–120 МПа ТГЛ должен содержать 10–18 % влаги на рабочую массу. Таким образом, учитывая физико-механические свойства ТГЛ, как полидисперсной многофазовой системы, способной к структурированию при определенных влагосодержании, давлении прессования и дисперсности, можно опреде-

лить технологию его окускования с целью получения окускованных лигнопродуктов с заданными свойствами, необходимыми потребителю.

Механо-активированный гидролизный лигнин является аморфным веществом и представляет собой порошок от светло-кремового до темно-коричневого цвета, обладает специфическим запахом. В составе гидролизного лигнина обнаруживаются: – собственно лигнин – 40–88 %; – трудногидролизуемые полисахариды – 13–45 %; – смолистые соединения и вещества лигногуминового комплекса – 5–19 %; – зольные элементы – 0,5–10 %. Отмечается, что лигнин является гигроскопичным веществом и обладает хорошей сорбционной способностью. Склонен к самовоспламенению, в составе аэрозолей способен к взрыванию. Лигнин воспламеняется при температуре 195 °С, самовоспламеняется при 425 °С, тлеет при 185 °С. Плотность лигнинного вещества составляет 1,33–1,34 г/см³, насыпная плотность – 190–220 кг/м³, размер частиц лигнина – 10–100 мкм, рН водного раствора – 6,2. Гидролизный лигнин является полимером, состоящим из фенилпропановых структурных единиц, он имеет ароматическую природу. Использование гидролизного лигнина на сегодняшний день ограничено наличием серной кислоты, однако известно, что у лигнина развитая капиллярная структура. Высказано предположение, что лигнин, пролежавший в отвалах более 40 лет, имеет низкое содержание свободной серной кислоты, поскольку за многолетнее «вылеживание» естественным путем происходит вымывание примесей атмосферными осадками.

Таблица 1
Элементный состав гидролизного лигнина

Лигнин	Содержание, % (масс.) на абсолютно сухое беззольное вещество		
	С	Н	S
Канского биохимического завода	61,52	5,92	0,50

Таблица 2
Дисперсность ТГЛ

Лигнин	Содержание фракций [% (масс.)] с размером частиц, мм				
	7–1	1–0,1	0,1–0,01	0,01–0,001	потери
Канского биохимического завода	20,7	46,3	20,0	13,0	±0,0

Возможно, снижение кислотности лигнина происходит в результате вымывания углеводных и фенольных примесей. При этом сохраняются гетерокапиллярная структура лигнина и большое количество наноразмерных пустот. Возможное использование такого вида сырья, подготовленного природой, позволит исключить стадию нейтрализации свободной кислоты и удаления низкомолекулярных продуктов, заключающуюся в промывке лигнина. После проведения механоактивации гидролизный лигнин представляет собой мелкодисперсный порошок коричневого цвета однородной консистенции. Средний размер его частиц составляет 5 мкм. Удельная поверхность лигнина до и после микронизации – 9,5 м²/г и 18,7 м²/г соответственно. Таким образом, механоактивация увеличивает удельную поверхность гидролизного лигнина и снижает количество остаточных полисахаридов, что является перспективным при его возможном использовании в технологическом процессе изготовления твердого топлива. Кроме того, при механоактивации лигнин повышает свою гидрофобность, на его поверхности появляются активные центры, что, вероятно, может положительно повлиять на его прочностные характеристики.

В ИК-спектре гидролизного лигнина идентифицированы следующие функциональные группы (рис. 4): свободные гидроксильные группы (3696,64 см⁻¹ и 3620,45 см⁻¹); гидроксильные фенольные группы (3696,64 см⁻¹ и 3620,45 см⁻¹); группы -CO- и группы -CH двойной связи (1418,67 см⁻¹); – метиленовые -CH₂- связи (2921,24 см⁻¹, 2851,8 см⁻¹); связанные гидроксильные группы во внутрикомплексных соединениях (2514,25 см⁻¹); галогенангидриды насыщенных и ненасыщенных кислот и карбонильные группы C=O (1795,76 см⁻¹); колебания ароматического кольца (1626,98 см⁻¹); колебания ацеталей -C-OH (950,92 см⁻¹); симметричные колебания кольца (913,31 см⁻¹); колебания -C-H в производных бензола (873,77 см⁻¹, 798,54 см⁻¹ и 778,29 см⁻¹); деформационные колеба-

ния связей C-H и C-O (873,77 см⁻¹); – маятниковые CH₂ колебания (778,29 см⁻¹).

Анализируя химический состав лигнина по ИК-спектру, можно увидеть, что в его спектре есть только ангидриды кислот и нет свободной серной кислоты, что подтверждается также измерением водородного показателя его водного раствора (pH = 6,2). Процесс снижения кислотности, вероятно, связан с блокировкой гидроксильных групп фенольной природы и декарбоксилированием карбоксильных групп. Эти группы гидрофильны, и в результате, после вымывания осадками, вероятно, в лигнине происходит конденсация простых эфирных связей, которые являются гидрофобными.

Отличительной особенностью является способность лигнина возможность его переходить в вязкопластическое состояние при воздействии высокого давления – порядка 100 МПа. Это обстоятельство способствовало развитию одного из перспективных направлений переработки ТГЛ – брикетированию. Исследовательские и опытно-промышленные разработки, показали, что лигнобрикеты являются высококалорийным бездымным бытовым топливом, качественным восстановителем в черной и цветной металлургии, способным заменить кокс, полукокс и древесный уголь, а также могут служить для производства угля типа древесного и изготовления из лигнобрикетов углеродистых сорбентов. Брикетирование – окускование при давлениях прессования от 15,0 до 150,0 МПа – менее чувствительно к свойствам исходного материала, и поэтому применяется для переработки разнообразных зернистых материалов дисперсностью до 10 мм (для грануляции требуются куски крупностью менее 74 мкм). Кроме того, достаточно разработано аппаратное оформление процесса, так как имеется многолетний практический опыт при производстве угле- и торфобрикетов.

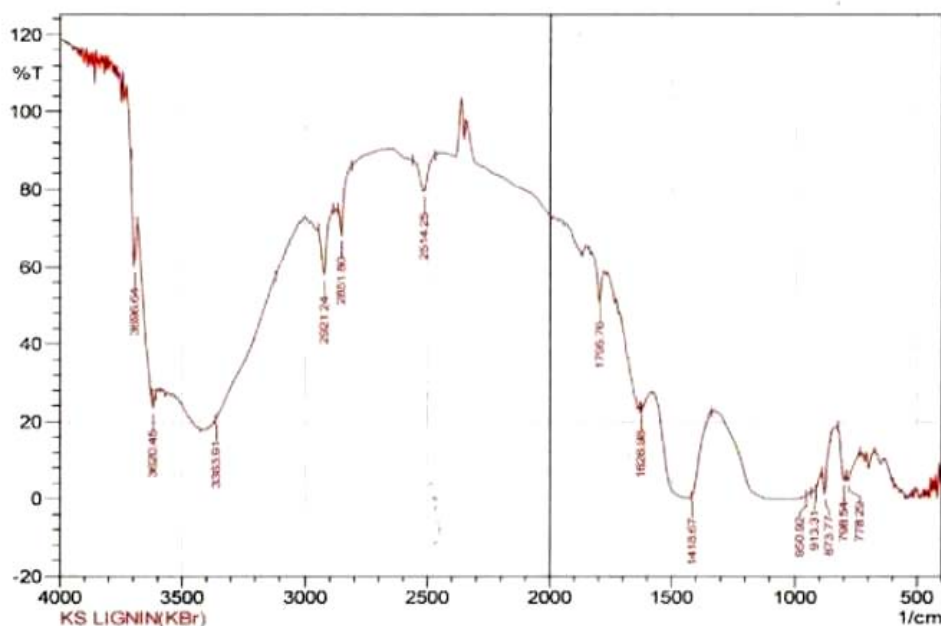


Рис. 4. ИК-спектр гидролизного лигнина

С точки зрения переработки вторичных ресурсов и рационального использования сырья брикетирование позволяет:

- 1) использовать мелкозернистые и слабоструктурные минеральные ресурсы;
- 2) утилизировать отходы, полученные в процессе добычи и переработки сырья, превращая их в товарный продукт;
- 3) расширить сырьевую базу за счет вовлечения в технологические процессы ранее не используемые материалы;
- 4) повысить производительность агрегатов, перерабатывающих брикеты, за счет однородности брикетов и наличия необходимых для процесса компонентов в одном куске (брикете);
- 5) перевести технологические схемы предприятий на замкнутый цикл за счет комплексного использования сырья и отходов;
- 6) снизить, а в некоторых случаях и исключить, загрязнение окружающей среды (рек, полей, воздушного бассейна);
- 7) сократить вырубку лесов, расходуемых на производство угля, за счет окускования отходов деревообработки.

К основным параметрам процесса брикетирования лигнина с целью получения прочных, без связующих веществ, сырых и пиролизированных брикетов следует отнести давление прессования и влажность лигнина. Установлено, что для ТГЛ определенной влажности существует свое оптимальное давление, которое возрастает с уменьшением содержания влаги. Так, при влажности 24 % оптимальное давление равно 100 МПа, а при влажности 15, 10 и 6 % – соответственно 250, 350, 400 МПа. Установлено, что скорость прессования, гранулометрический состав, крупность, химический состав материала не оказывают существенного влияния на прочность брикетов из ТГЛ. Причем влияние этих параметров компенсируется высоким давлением прессования (порядка 100 МПа), необходимым для получения прочных брикетов. Брикетированность лигнина в значительной степени зависит от температуры. При увеличении температуры подсушенного лигнина и прессформы до 150 °С пластические свойства лигнина улучшаются, что позволяет получать прочные и водостойчивые брикеты без трещин при значительно более низких давлениях прессования, чем при «холодном» брикетировании.

На основании полученных экспериментальных данных и анализа литературных источников предлагается следующие схемы получения лигнобрикетов.

Комплекс состоит из двух параллельных технологических линий. Товарная продукция – топливные брикеты. Сырой лигнин отбирается экскаватором, доставляется автотранспортом к месту переработки, складывается на открытой площадке, рассчитанной на трехдневный запас сырья. Технологический процесс начинается с сушки лигнина (насыпная масса сырого лигнина примерно 100 кг/м³) в сушильном барабане производительностью 15 т/ч. Время сушки 15 мин. Теплоносителем служат газообразные продукты сгорания: 180–250 °С. Производительность барабана по сухому лигнину не менее 10 т/ч. Лигнин с содержа-

ем влаги не выше 5 % при 120 °С поступает без промежуточного хранения в подогреватель винтового типа с тепловой рубашкой, по которой циркулирует газообразный теплоноситель (500 °С). Разогретый до 320–350 °С лигнин теряет до 7,5 % массы (5 % – испарение остаточной физической воды, 2,5 % – бертенирование) и затем загружается по 1,5 т в контейнеры-реторты объемом 15 м³, где происходит пиролиз за счет экзотермических реакций. Газообразные и жидкие (жижка) продукты термического распада отводятся, а полученный твердый обугленный продукт, раскаленный до 800 °С, выгружается в винтовой охладитель, служащий еще и смесителем, где орошается водосмоляным конденсатом. За счет тепловой энергии обугленного продукта вода испаряется, а смолистые компоненты и вещества, растворенные в водосмоляном конденсате, адсорбируются на его частичках. Из смесителя обугленная масса при 60–80 °С немедленно подается в пресс-формы гидравлического пресса СМ-301 Б или СМ-1085 для брикетирования. Формованные брикеты хранятся на складе готовой продукции при температуре не выше 40 °С и во избежание случайного возгорания продуваются воздухом с повышенным содержанием влаги. Упакованная в бигбэги продукция отправляется потребителю. В результате охлаждения пиролизного газа до температуры окружающей среды пары воды и смол конденсируются с образованием неконденсирующегося газа (выход примерно 37,3 %), и водосмоляного конденсата (примерно 62,7 %). Плотность неконденсирующегося газа 1,22 кг/м³, теплотворная способность 4215 ккал/кг. Водосмоляной конденсат состоит из воды, смолы и водорастворенных кислородных соединений. Плотность топливного брикета 1250–1300 кг/м³, теплотворная способность 7750 ккал/кг. Из 2,7 млн т лигнина в Канском хранилище можно получить до 1 млн т обугленного углеродного продукта. Мощность технологической линии принимается из расчета ликвидации хранилища за 10 лет, то есть получения 100 тыс. т обугленного продукта в год. Затем линия будет работать на отходах деревообрабатывающих предприятий Канского района. Спрос на экологически чистое топливо обеспечивается требованиями охраны воздушного пространства г. Красноярска и других городов края. Данное решение позволит: – ликвидировать отходы Канского БХЗ; – создать новое производство и востребованный продукт; – создать новых рабочие места. Побочные продукты технологического процесса: – тепловая энергия ~ 2 млн Гкал/год; – электроэнергия ~ 1+ млн квт/ч. Персонал нового предприятия составит от 40 до 120 человек; объем инвестиций ориентировочно составит 500 млн руб.

Качественные характеристики полученного брикета топливного лигнина удовлетворяют показателям, представленным в табл. 3.

Результаты исследования состава золы от сжигания лигнинного брикета представлены в табл. 4.

Лигнобрикеты представляют собой высококачественное топливо с низким содержанием золы. При сжигании брикеты лигнина горят бесцветным пламенем, не выделяя коптящего дымового факела.

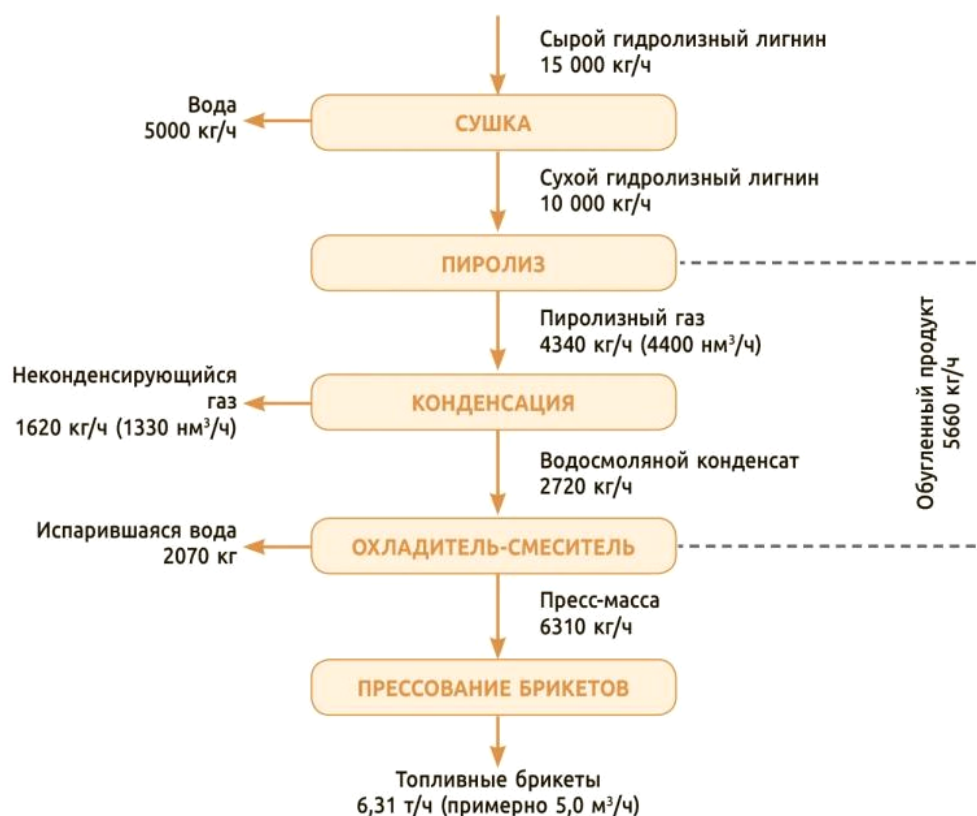


Рис. 5. Принципиальная схема получения топливных брикетов из обугленного лигнина

Таблица 3
Качественная характеристика топливного брикета

Показатель	Значение показателя
Массовая доля общей влаги (W _г) в рабочем состоянии топлива не более, %	22
Зольность (Ad) не более, %	20
Массовая доля мелочи (куски размером менее 25 мм) не более, %	8
Содержание серы (Sr) не более, %	0,4
Теплотворная способность, не менее, ккал/кг	7750

Таблица 4
Состав золы от сжигания лигнинного брикета

Соединение	Содержание, %
Al ₂ O ₃	4,7
SiO ₂	91,3
P ₂ O ₅	1,9
CaO	0,5
Na ₂ O	0,5
K ₂ O	0,3
MgO	0,4
TiO ₂	0,4

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что технический гидролизный лигнин является многокомпонентным соединением, включает собственно технический лигнин (60–70 %) и сопутствующие вещества: экстрактивные вещества (7–22 %), представленные (органическая часть) моносахаридами и продуктами их распада, терпеновыми углеводородами и их кислородсодержащими производными, ароматическими соединениями, алифатическими углеводородами, высокомолекулярными кислотами; остаточные полисахариды (2–8 %).

В ходе исследования структурно-механических свойств, фракционного состава, физико-химических характеристик установлена возможность переработки гидролизного лигнина с получением высококачественного биотоплива.

Предварительная обработка в форме механоактивации способствует стабилизации гранулометрического состава и усреднению влажности исследуемого лигнина. Механоактивация увеличивает удельную поверхность гидролизного лигнина и снижает количество остаточных полисахаридов, что является перспективным при его возможном использовании

в технологическом процессе изготовления твердого топлива. Кроме того, при механоактивации лигнин повышает свою гидрофобность, на его поверхности появляются активные центры, что, вероятно, может положительно повлиять на его прочностные характеристики.

Предложен способ переработки гидролизного лигнина из отвалов Канского биохимического завода, благодаря которому возможно снизить антропогенную нагрузку на атмосферный воздух, почву ликвидацией хранилища, с получением альтернативного биотоплива.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Муслимов Р. Х., Плотнокова И. Н. Возобновляются ли запасы нефти? // ЭКО. 2012. № 1 (451). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozobnovlyayutsya-li-zapasy-nefti> (дата обращения: 14.07.2025).
2. О проблеме истощения мировых запасов нефти / Д. Л. Рахманкулов, С. В. Николаева, Ф. Н. Латыпова, Ф. Ш. Вильданов // Баш. хим. ж. 2008. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-probleme-istoscheniya-mirovyh-zaprov-nefti> (дата обращения: 14.07.2025).
3. Иванов И. С. Получение газообразного и жидкого биотоплива // Материалы XIII Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум». URL: <https://scienceforum.ru/2021/article/2018027488> (дата обращения: 14.07.2025).
4. ГОСТ Р 52808–2007. Нетрадиционные технологии. Энергетика биоотходов. Термины и определения. Москва : Стандартинформ, 2008. 8 с.
5. Возможности использования гидролизного лигнина как восстановителя металлов из пыли дуговых электропечей / Л. Ю. Коваленко, А. П. Анзулевич, Д. А. Калганов, Л. Н. Бутько, Д. А. Захаревич // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-vozmozhnosti-ispolzovaniya-gidroliznogo-lignina-kak-vozstanovitelya-metallov-iz-pyli-dugovyh-elektropetchey> (дата обращения: 14.07.2025).
6. ГОСТ 17.4.4.02–2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. Москва : Стандартинформ, 2018. 10 с.
7. Алемасова А. С., Рокун А. Н., Шевчук И. А. Аналитическая атомно-абсорбционная спектроскопия. Севастополь : Вебер, 2003. 327 с.
8. Сердюкова А. Ф., Барабанщиков Д. А. Загрязнение окружающей среды отходами производств // Молодой ученый. 2018. № 25. 211 с.
9. Булаткин Г. А. Производство биотоплива второго поколения из растительного сырья // Вестник Российской Академии наук. 2010. Т. 80, № 5–6. С. 522–532.
10. Орси́к Л. С., Сорокин Н. Т., Федоренко В. Ф. Биоэнергетика: мировой опыт и прогнозы развития. Москва : Росинформагротех, 2008. 404 с.
11. Севастьянов С. Н. Биоэнергетика. Древесные (топливные) гранулы // Вестник ОГУ. 2009. № 10 (104). С. 133–138.
12. Гелес И. С. Древесное сырье – стратегическая основа и резерв цивилизации. Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 2007. 499 с.
13. Пугин К. Г. Промышленная экология. Утилизация крупнотоннажных отходов производства : учебное пособие. Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2016. 95 с.
14. Варфоломеев С. Д., Моисеев И. И., Мясоедов Б. Ф. Энергоносители из возобновляемого сырья. Химические аспекты // Вестник РАН. 2009. Т. 79, № 7. С. 595–604.
15. Энергоемкость прессования древесного сырья при производстве биотоплива / М. А. Михеевская, В. П. Друзьянова, Д. Д. Бурмистрова [и др.] // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. № 241. С. 207–217. DOI 10.21266/2079-4304.2022.241.207-217.
16. Теоретический анализ процесса брикетирования измельченных древесных материалов в условиях лесного терминала / О. А. Куницкая, А. В. Помигуев, Д. Д. Бурмистрова, Е. А. Тихонов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2021. № 9. С. 25–33. DOI 10.31044/1684-2561-2021-0-9-25-33.
17. Определение оптимального состава биотоплива / Р. И. Тагиров, Е. В. Мыльникова, А. Д. Байгилина, Д. Р. Хинкиладзе // Вестник науки. 2020. Т. 2, № 3(24). С. 95–99.
18. Басуматорова Е. А., Норматов Ш. Ш. Перспективы использования биотоплива и альтернативных источников энергии // АгроЭкоИнфо. 2023. № 5(59). DOI 10.51419/202135538.
19. Ибраилова Э. А., Д Личковаха. В. Рынок твердого биотоплива Российской Федерации // Вестник Ростовского государственного экономического университета (РИНХ). 2022. № 3(79). С. 152–158. DOI 10.54220/v.rsue.1991-0533.2022.79.3.020.
20. Вопросы структурной организации лигнина и перспективы его переработки / А. Ю. Кожевников, С. Л. Шестаков, Ю. А. Сыпалова // Химия растительного сырья. 2023. № 2. С. 5–26. DOI 10.14258/jcprn.20230211737.
21. Paone E., Mauriello F., Tabanelli T. The rise of lignin biorefinery // Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry. 2020. Vol. 24. P. 1–6. DOI 10.1016/j.cogsc.2019.11.004.
22. Кузминых Ю. В. Анализ развития мирового рынка твердого биотоплива в современных условиях // Актуальные проблемы экономики и управления. 2023. № 1(12). С. 217–224. DOI 10.52899/978-5-88303-660-5_217.
23. Сыпалова Ю. А., Покрышкин С. А., Кожевников А. Ю. Исследование мономерного состава лигнинов при пиролизическом разложении // Химия и технология растительных веществ : тезисы докладов XIII Международной научной конференции со школой молодых ученых, Сыктывкар, 28.05–01.06.2024. Киров : ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 2024. С. 179.
24. Optimization of Approaches to Analysis of Lignin by Thermal Decomposition / S. Pokryshkin, Yu. Syalova, A. Ivahnov, A. Kozhevnikov // Polymers. 2023. Vol. 15, No. 13. P. 2861. DOI 10.3390/polym15132861.
25. Использование органических отходов в качестве сырья для различных методов получения биотоплива (обзор) / А. Д. Горбенко, М. А. Каплан, А. В. Квитко, М. А. Севастьянов // Достижения науки

и техники АПК. 2023. Т. 37, № 4. С. 61–68. DOI 10.53859/02352451_2023_37_4_61.

26. Линник В. Ю., Линник Ю. Н. Состояние и перспективы развития биоэнергетики // Вестник университета. 2019. № 10. С. 59–66. DOI 10.26425/1816-4277-2019-10-59-66.

27. Кравченко Р. В. Состояние и тенденции развития рынка биотоплива // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2013. № 4. С. 188–196.

28. Любов В. К., Цыпнятов И. И. Повышение эффективности энергетического использования биотоплива // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2023. № 1(391). С. 172–185. DOI 10.37482/0536-1036-2023-1-172-185.

29. Мохирев А. П., Безруких Ю. А., Медведев С. О. Переработка древесных отходов предприятий лесопромышленного комплекса, как фактор устойчивого природопользования // Инженерный вестник Дона. 2015. № 2-2(36). С. 81.

30. Покрышкин С. А., Сыпалова Ю. А., Кожевников А. Ю. Исследование мономерного состава лигнинов с использованием диаграмм RDBE и Ван-Кревелена // Химия и технология растительных веществ : тезисы докладов XIII Международной научной конференции со школой молодых ученых, Сыктывкар, 28.05–01.06.2024. Киров : ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 2024.

REFERENCES

1. Muslimov R. H., Plotnikova I. N. Vozobnovlyayutsya li zapasy nefti? // EKO. 2012. № 1 (451). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozobnovlyayutsya-li-zapasy-nefti> (data obrashcheniya: 14.07.2025).

2. O probleme istoshcheniya mirovyh zasobov nefti / D. L. Rahmankulov, S. V. Nikolaeva, F. N. Latypova, F. Sh. Vil'danov // Bash. him. zh. 2008. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-probleme-istoscheniya-mirovyh-zasobov-nefti> (data obrashcheniya: 14.07.2025).

3. Ivanov I. S. Poluchenie gazoobraznogo i zhidkogo biotopliva // Materialy XIII Mezhdunarodnoj studencheskoj nauchnoj konferencii «Studencheskij nauchnyj forum» URL: <https://scienceforum.ru/2021/article/2018027488> (data obrashcheniya: 14.07.2025).

4. GOST R 52808–2007. Netradicionnye tekhnologii. Energetika biootvodov. Terminy i opredeleniya. Moskva : Standartinform, 2008. 8 s.

5. Vozmozhnosti ispol'zovaniya gidroliznogo lignina kak vosstanovitelya metallov iz pyli dugovyh elektropechej / L. Yu. Kovalenko, A. P. Anzulevich, D. A. Kalganov, L. N. But'ko, D. A. Zahar'evich // Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2023. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-vozmozhnosti-ispolzovaniya-gidroliznogo-lignina-kak-vosstanovitelya-metallov-iz-pyli-dugovyh-elektropechej> (data obrashcheniya: 14.07.2025).

6. GOST 17.4.4.02–2017. Ohrana prirody. Pochvy. Metody otbora i podgotovki prob dlya himicheskogo, bakteriologicheskogo, gel'mintologicheskogo analiza. Moskva : Standartinform, 2018. 10 s.

7. Alemasova A. S., Rokun A. N., Shevchuk I. A. Analiticheskaya atomno-absorbcionnaya spektroskopiya. Sevastopol' : Veber, 2003. 327 s.

8. Serdyukova A. F., Barabanshchikov D. A. Zagryaznenie okruzhayushchej sredy othodami proizvodstv // Molodoy uchenyj. 2018. № 25. 211 s.

9. Bulatkin G. A. Proizvodstvo biotopliva vtorogo pokoleniya iz rastitel'nogo syr'ya // Vestnik Rossijskoj Akademii nauk, 2010. T. 80, № 5–6. S. 522–532.

10. Orsik L. S., Sorokin N. T., Fedorenko V. F. Bioenergetika: mirovoj opyt i prognozy razvitiya. Moskva : Rosinformagrotekh, 2008. 404 s.

11. Sevast'yanov S. N. Bioenergetika. Drevesnye (toplivnye) granuly // Vestnik OGU. 2009. № 10 (104). S. 133–138.

12. Geles I. S. Drevesnoe syr'e – strategicheskaya osnova i rezerv civilizacii. Petrozavodsk : Karel'skij nauchnyj centr RAN, 2007. 499 s.

13. Pugin K. G. Promyshlennaya ekologiya. Utilizaciya krupnotonnazhnyh othodov proizvodstva: uchebnoe posobie. Perm' : Izd-vo PNIPU, 2016. 95 s.

14. Varfolomeev S. D., Moiseev I. I., Myasoedov B. F. Energonositeli iz vozobnovlyаемого syr'ya. Himicheskije aspekty // Vestnik RAN. 2009. T. 7, № 7. S. 595–604.

15. Energoemkost' pressovaniya drevesnogo syr'ya pri proizvodstve biotopliva / M. A. Miheevskaya, V. P. Druz'yanova, D. D. Burmistrova [i dr.] // Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii. 2022. № 241. S. 207–217. DOI 10.21266/2079-4304.2022.241.207-217.

16. Teoreticheskij analiz processa briketirovaniya izmel'chennyh drevesnyh materialov v usloviyah lesnogo terminala / O. A. Kunickaya, A. V. Pomiguyev, D. D. Burmistrova, E. A. Tihonov // Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya. 2021. № 9. S. 25–33. DOI 10.31044/1684-2561-2021-0-9-25-33.

17. Opredelenie optimal'nogo sostava biotopliva / R. I. Tagirov, E. V. Myl'nikova, A. D. Bajgil'dina, D. R. Hinkiladze // Vestnik nauki. 2020. T. 2, № 3(24). S. 95–99.

18. Basumatorova E. A., Normatov Sh. Sh. Perspektivy ispol'zovaniya biotopliva i al'ternativnyh istochnikov energii // AgroEkoInfo. 2023. № 5(59). DOI 10.51419/202135538.

19. Israilova E. A., Lichkovaha D. V. Rynok tverdogo biotopliva Rossijskoj Federacii // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta (RINH). 2022. № 3(79). S. 152–158. DOI 10.54220/v.rsue.1991-0533.2022.79.3.020.

20. Kozhevnikov A. Yu., Shestakov S. L., Syalova Yu. A. Voprosy strukturnoj organizacii lignina i perspektivy ego pererabotki // Himiya rastitel'nogo syr'ya. 2023. № 2. S. 5–26. DOI 10.14258/jcpm.20230211737.

21. Paone E., Mauriello F., Tabanelli T. The rise of lignin biorefinery // Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry. 2020. Vol. 24. P. 1–6. DOI 10.1016/j.cogsc.2019.11.004.

22. Kuzminyh Yu. V. Analiz razvitiya mirovogo rynka tverdogo biotopliva v sovremennyh usloviyah // Aktual'nye problemy ekonomiki i upravleniya. 2023. № 1(12). S. 217–224. DOI 10.52899/978-5-88303-660-5_217.

23. Syalova Yu. A., Pokryshkin S. A., Kozhevnikov A. Yu. Issledovanie monomernogo sostava ligninov pri piroliticheskom razlozhenii // Himiya i tekhnologiya rastitel'nyh veshchestv : tezisy dokladov XIII Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii so shkoloj molodyh

uchenyh, Syktyvkar, 28.05–01.06.2024. Kirov : FIC Komi NC UrO RAN, 2024. S. 179.

24. Optimization of Approaches to Analysis of Lignin by Thermal Decomposition / S. Pokryshkin, Yu. Sypalova, A. Ivahnov, A. Kozhevnikov // *Polymers*. 2023. Vol. 15, No. 13. P. 2861. DOI 10.3390/polym15132861.

25. Ispol'zovanie organicheskikh othodov v kachestve syr'ya dlya razlichnykh metodov polucheniya biotopliva (obzor) / A. D. Gorbenko, M. A. Kaplan, A. V. Kvitko, M. A. Sevost'yanov // *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2023. T. 37, № 4. S. 61–68. DOI 10.53859/02352451_2023_37_4_61.

26. Linnik V. Yu., Linnik Yu. N. Sostoyanie i perspektivy razvitiya bioenergetiki // *Vestnik universiteta*. 2019. № 10. S. 59–66. DOI 10.26425/1816-4277-2019-10-59-66.

27. Kravchenko R. V. Sostoyanie i tendencii razvitiya rynka biotopliva // *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoj vestnik*. 2013. № 4. S. 188–196.

28. Lyubov V. K., Cypnyatov I. I. Povyshenie effektivnosti energeticheskogo ispol'zovaniya biotopliva // *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Lesnoj zhurnal*. 2023. № 1(391). S. 172–185. DOI 10.37482/0536-1036-2023-1-172-185.

29. Mohirev A. P., Bezrukih Yu. A., Medvedev S. O. Pererabotka drevesnykh othodov predpriyatij lesopromyshlennogo kompleksa, kak faktor ustojchivogo prirodopol'zovaniya // *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2015. № 2-2(36). S. 81.

30. Pokryshkin S. A., Sypalova Yu. A., Kozhevnikov A. Yu. Issledovanie monomernogo sostava ligninov s ispol'zovaniem diagramm RDBE i Van-Krevelena // *Himiya i tekhnologiya rastitel'nykh veshchestv : tezisy dokladov XIII Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii so shkoloy molodykh uchenykh, Syktyvkar, 28.05–01.06.2024. Kirov : FIC Komi NC UrO RAN, 2024.*

© Есякова О. А., Кох Ж. А., 2025

Поступила в редакцию 20.05.2025
Принята к печати 04.08.2025

КОНТАКТНАЯ СТУПЕНЬ ДИАБАТИЧЕСКОЙ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ**В. А. Чернов, Н. Ю. Кожухова, О. П. Жукова, Н. А. Войнов**

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: sitkova72@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования новой контактной ступени диабатической ректификационной колонны рекомендуемой для использования в лесохимической промышленности. Она имеет низкую металлоемкость, гидравлическое сопротивление, удерживающую способность в сочетании с высокой разделительной способностью. Устройство включает насадку для обеспечения перекрестного тока паров, размещенную в коаксиально установленных перфорированных стаканах, над которыми установлены теплообменное устройство и профилированные пластины для осуществления на них частичной конденсации и испарения. Исследована эффективность контактной ступени в зависимости от концентрации летучих компонентов в смеси и ее гидравлическое сопротивление. Изучена интенсивность конденсации смеси паров этанол-вода на поверхности теплообменного устройства и на поверхности горизонтально установленных пластин контактной ступени. Установлены уравнения для расчета величины коэффициентов теплоотдачи. Исследована интенсивность испарения летучих компонентов с поверхности пластин, получена зависимость, позволяющая оценить расход испарившихся паров с поверхности пластины и удельную тепловую нагрузку сконденсировавшихся паров под пластиной. Показано распределение концентрации этанола в поднимающихся парах и в конденсате по высоте контактной ступени. Достигнуто снижение металлоемкости, удерживающей способности, сопротивления и эффективности в сравнении с насадочной адиабатической противоточной колонной.

Ключевые слова: теплоотдача, испарение, диабатическая ректификация, парциальная конденсация, эффективность.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 4, P. 85–92

A CONTACT TRAY FOR A DIABATIC DISTILLATION COLUMN**V. A. Chernov, N. Yu. Kozhuhova, O. P. Zhukova, N. A. Voinov**

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: sitkova72@mail.ru

Annotation. The results of the study of a new contact tray for a diabatic distillation column that is recommended for use in the wood chemical industry are presented. The presented tray has low metal consumption, hydraulic resistance and holding capacity combined with high separating one. The device includes a packing to provide a cross current flow of vapors located in coaxially mounted perforated cylinders, above which a heat exchanger device and profiled plates are placed to perform a partial condensation and evaporation. The efficiency of the tray is investigated with a respect to the concentration of volatile components in the mixture and its hydraulic resistance. The intensity of an ethanol-water vapor mixture condensation on the surface of a heat exchanger coil and on the surface of horizontally mounted plates of a tray has been studied. The equations for calculating the values of the heat transfer coefficients are established. The evaporation of volatile components from the surface of the plates is investigated, and dependence is obtained, that makes it possible to estimate the consumption of vapors from the surface of the plate and the specific heat load of condensed vapors under the plate. The concentrations of ethanol in rising vapors and condensate along the height of the tray is shown. A reduction of a metal consumption, holding capacity, flow resistance and efficiency has been achieved in comparison with the adiabatic countercurrent column.

Keywords: heat transfer, evaporation, diabatic distillation, partial condensation, efficiency.

ВВЕДЕНИЕ

Ректификация применяется в технологиях комплексной переработки древесины, в процессах извлечения биологически активных веществ из растительного сырья; химической переработки древесины и

природных отходов газификацией. В лесохимической промышленности ректификация используется при получении таллового масла, концентрата пальмитиновой кислоты, абсолютированного этанола из отходов древесины, очистке и получении скипидара, реге-

нерации растворителей при экстракции хвои древесины [1–3].

Перерабатываемые смеси, как правило, многокомпонентны, термически неустойчивы и подвержены очистке. Например, целлюлозно-бумажные предприятия России производят скипидар сульфатный сырец с содержанием серы около 2 %, однако, для его широкого использования на практике допустимое содержание серы должно составлять 0,005 %. Разработанные методы очистки сульфатного скипидара в большинстве методов [4] предусматривают на конечной стадии процесса применение вакуумной ректификации с использованием установок с низким гидравлическим сопротивлением, высокой разделяющей способностью и эффективностью.

Используемые в промышленности традиционные адиабатические ректификационные установки габаритны, потребляют большие расходы теплоносителя и не эффективны [5; 6].

На ступенях таких колонн размещены большие объемы жидкости, что приводит к потерям разделяемых веществ и снижает их безопасность. На них приходится более 40 % общего потребления энергии в технологическом производстве [7]. Это привело к разработке новых энергоэффективных технологий на основе диабатической ректификации [8–11]. Одно из таких решений предусматривает размещение теплообменных устройств непосредственно на тарелках ректификационной колонны, что позволяет снизить разницу температуры между поднимающимися парами и жидкостью на ступени, обеспечить равномерное распределение флегмы по высоте установки, уменьшить ее габариты и металлоемкость, а также интенсифицировать процесс разделения [12].

Однако для успешного внедрения таких установок в производство и управления процессом необходимы надежные данные по расчету тепломассообмена на ступенях.

В этой связи целью работы является разработка контактной ступени для диабатической ректификационной колонны с низким гидравлическим сопротивлением, высокой эффективностью и исследование на них параметров тепломассопереноса.

Для поставленной цели представляют интерес ректификационные колонны, тарелки которых выполнены из горизонтально установленных пластин [13–15], на которых одновременно протекают направленные

процессы парциальной конденсации и испарения. Они обладают низким сопротивлением, содержат сравнительно небольшое количество жидкости на тарелке и обладают широкими возможностями для обеспечения на них высокой эффективности разделения путем варьирования тепловыми потоками [16; 17].

Разработанный авторами [18] контактный элемент такой тарелки, выполненный из профилированных медных пластин с насадкой перекрестного тока, представлен на рис. 1. Контактное устройство состоит из двух перфорированных коаксиально установленных стаканов с образованием кольцевой полости, которая заполнена насадкой и снабжена горизонтальной перегородкой с отверстиями для прохода жидкости. Над насадкой размещены профилированные верхние и нижние пластины. На верхних пластинах выполнена отбортовка для удержания тонкого слоя жидкости на них и осуществления процесса испарения и конденсации. Нижние пластины предназначены для отвода конденсата образованного под пластинами с целью устранения его попадания в конденсат, стекающий последовательно по верхним пластинам.

В задачи исследования входило определение гидравлического сопротивления контактного устройства и его эффективности, а также – теплоотдачи при конденсации поднимающихся паров на поверхности теплообменного устройства и на поверхности пластин, испарения конденсата, распределения концентрации легколетучего компонентов в парах и жидкости по высоте устройства.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Схема установки, на которой проводились исследования, представлена на рис. 2. Она состоит из куба 1, ректификационной колонны 2 с контактными ступенями 3, технологического трубопровода со смотровым окном 4 и конденсатора 5 со змеевиковым теплообменником 6. Установка также снабжена технологическими штуцерами для отбора проб жидкости и пара, бобышками для установки датчиков измерения температуры и давления. Контактная ступень состоит из теплообменника 7, верхних пластин 8 и нижних пластин 9, горизонтальной перегородки 10 с отверстиями для прохода жидкости 11 под которыми установлены коаксиальные перфорированные стаканы 12, заполненные насадкой 13.



Рис. 1. Общий вид контактного устройства (а), насадки (б, в), пластины (г)

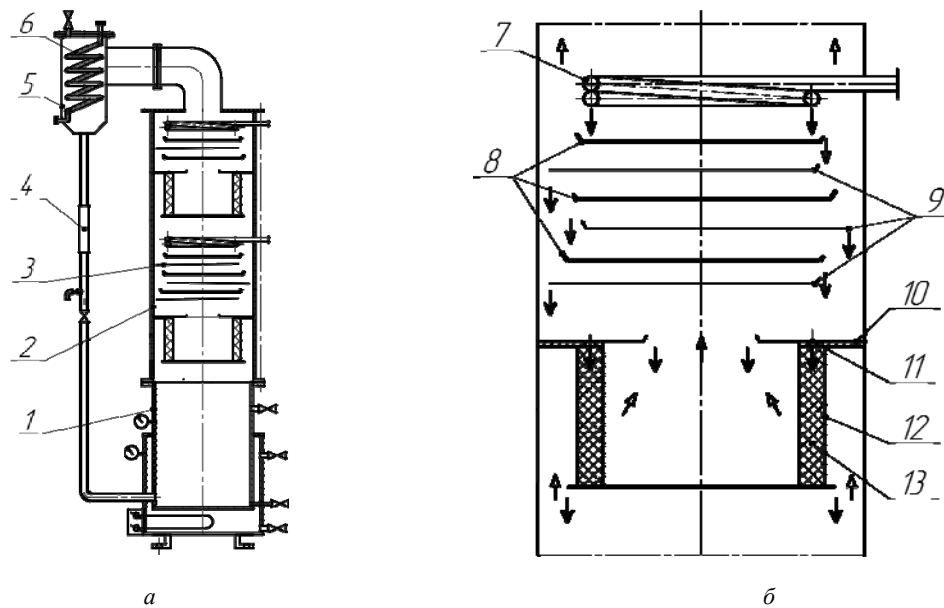


Рис. 2. Схема экспериментальной колонны (а) и контактной ступени (б):

1 – куб; 2 – ректификационная колонна; 3 – контактные ступени; 4 – технологический трубопровод; 5 – смотровое окно; 6 – конденсатор; 7 – теплообменник; 8 – верхние пластины; 9 – нижние пластины; 10 – перегородка; 11 – отверстия; 12 – перфорированные стаканы; 13 – насадка; потоки: $\rightarrow$ – конденсат с поверхности теплообменника; $\rightarrow$ – конденсат, образованный под пластинами 8

Диаметр колонны составил 219 мм, верхних пластин – 150 мм, нижних пластин – 120 мм. Расстояние между пластинами устанавливалось равным 15 мм. Пластины выполнялись из медного листа толщиной 0,25 мм с высотой отбортовки 1 мм.

Было исследовано два типа насадки, которая размещалась в кольцевой полости, образованной двумя перфорированными стаканами, а именно спирально-призматическая насадка (3×4 мм), выполненная из нихромовой проволоки диаметром 0,18 мм, и регулярная насадка – из алюминиевого просечного листа толщиной 1,5 мм.

Наружный диаметр стакана равен 120 мм. Толщина слоя насадки изменялась от 18 до 40 мм, а высота насадки составила 45 и 90 мм. Контактная ступень снабжена теплообменником 7, выполненным из медной трубки диаметром 5 мм с поверхностью 0,012 м². Конденсатор колонны имел поверхность 0,036 м², мощность электронагревателей куба составила 15 кВт.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на модельной смеси этанол-вода.

Эффективность тарелки при осуществлении абсорбции рассчитывалась по зависимости:

$$E_x = \frac{c - c_0}{c^* - c_0}, \quad (1)$$

где c – концентрация кислорода в жидкости на тарелке, кг/м³; c_0 – начальная концентрация кислорода в жидкости, кг/м³; c^* – равновесная концентрация кислорода в жидкости, кг/м³.

Концентрация кислорода в воде определялась датчиком полярографического типа.

Концентрация этанола измерялась в паровой и жидкой фазах. Состав этилового спирта определялся рефрактометром марки LR-3, его тарировка осуществлялась с использованием хромато-масс-спектрометра YCDplus.

Расход пара и жидкости по колонне рассчитывался исходя из материального и теплового балансов.

Эффективность тарелки при ректификации смеси этанол-вода определялась по формуле

$$E_y = \frac{y_{ex} - y_{ent}}{y^* - y_{ent}}, \quad (2)$$

где y^* – равновесная концентрация паров с жидкостью на горизонтальной перегородке тарелки, % мольн.; y_{ent} – концентрация паров этанола на входе тарелки, % мольн.; y_{ex} – концентрация паров этанола на выходе тарелки, % мольн.

Удельный тепловой поток сконденсировавшихся паров на поверхности теплообменника q , Вт/м², определялся по зависимости

$$q = \frac{Q}{f}, \quad (3)$$

где Q – тепловой поток сконденсировавшихся паров, Вт; f – теплопередающая поверхность теплообменника, м².

$$Q = G \cdot c (t_{ex} - t_{ent}), \quad (4)$$

где G – расход воды через теплообменник, кг/с; c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C); t_{ex} , t_{ent} – выходная и входная температура теплоносителя соответственно, °C.

Коэффициент теплопередачи теплообменника K , Вт/м²·K, определялся по формуле

$$K = \frac{Q}{f \cdot \Delta t}, \quad (5)$$

где Δt – среднелогарифмическая разность температур, °C.

Коэффициент теплоотдачи при конденсации паров на верхних пластинах $\alpha_{\text{кон}}$, Вт/м²·К, рассчитывался по зависимости

$$\alpha_{\text{кон}} = \frac{Q}{F \cdot (t_n - t_c)}, \quad (6)$$

где t_n – температура паров, °C; t_c – температура стенки пластины, °C; F – поверхность пластины, м².

Коэффициент теплоотдачи при конденсации паров на поверхности теплообменника определялся на основании формулы (5) и расчетного значения коэффициента теплоотдачи. Величина теплового и материального потоков определялась согласно балансам. Величина гидравлического сопротивления измерялась дифференциальным манометром. Температура измерялась термодатчиками марки NTC 10K.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования теплоотдачи при конденсации паров смеси этанол-вода на поверхности теплообменника 7, рис. 2, представлены на рис. 3, а.

Установлено два основных режима процесса конденсации паров: пленочный и псевдокапельный. Смена режимов обусловлена изменением структуры капель и пленки конденсата на поверхности трубы [19]. Согласно полученным данным, с увеличением концентрации этанола в паровой смеси, а также разности температур между конденсирующими парами и стенкой трубы, интенсивность теплоотдачи снижается.

Как нами установлено, значения коэффициента теплоотдачи в псевдокапельном режиме подчиняются зависимости [20]

$$Nu = 1,61 \cdot 10^{-7} Re^{-1,49} \pi_k^{0,3} Pr^{1/3}, \quad (7)$$

где $Nu = \frac{2\alpha_{\text{кон}} \cdot \sigma \cdot t_n}{\lambda \cdot r \cdot \rho (t_n - t_c)}$ – критерий Нуссельта;

$Re = \frac{\lambda \cdot (t_n - t_c)}{r \cdot \mu}$ – критерий Рейнольдса; Pr – критерий

Прандтля; π_k – число подобия.

Экспериментальные данные при пленочном режиме конденсации паров с погрешностью 35 % подчиняются зависимости [21]

$$\alpha_{\text{кон}} = C \left[\frac{r \rho^2 \lambda^3 g}{\mu d (t_n - t_c)} \right], \quad (8)$$

где C – постоянная; g – теплота фазового превращения при температуре t_n , Дж/кг; ρ – плотность, кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; d – диаметр пластины, м.

Уравнение (8) не учитывает влияние на теплоотдачу поверхностного натяжения конденсата, что и обуславливает сравнительно большую погрешность.

Результаты исследования теплоотдачи при конденсации паров на поверхности верхних пластин представлены на рис. 3, б. Величина коэффициента теплоотдачи оказалась на порядок ниже, чем в случае конденсации на поверхности горизонтальной трубы теплообменника 7. Согласно полученным данным при плотности орошения конденсата менее 0,005 кг/(с·м²) наблюдается резкое снижение интенсивности конденсации, что обусловлено появлением несмоченных участков на поверхности пластин. В зависимости от температуры стенки пластины также наблюдается два режима конденсации. Уравнение (8) при значении коэффициента $C = 0,09$ позволяет оценить величину коэффициента теплоотдачи, что показано на рис. 3, б пунктирной линией.

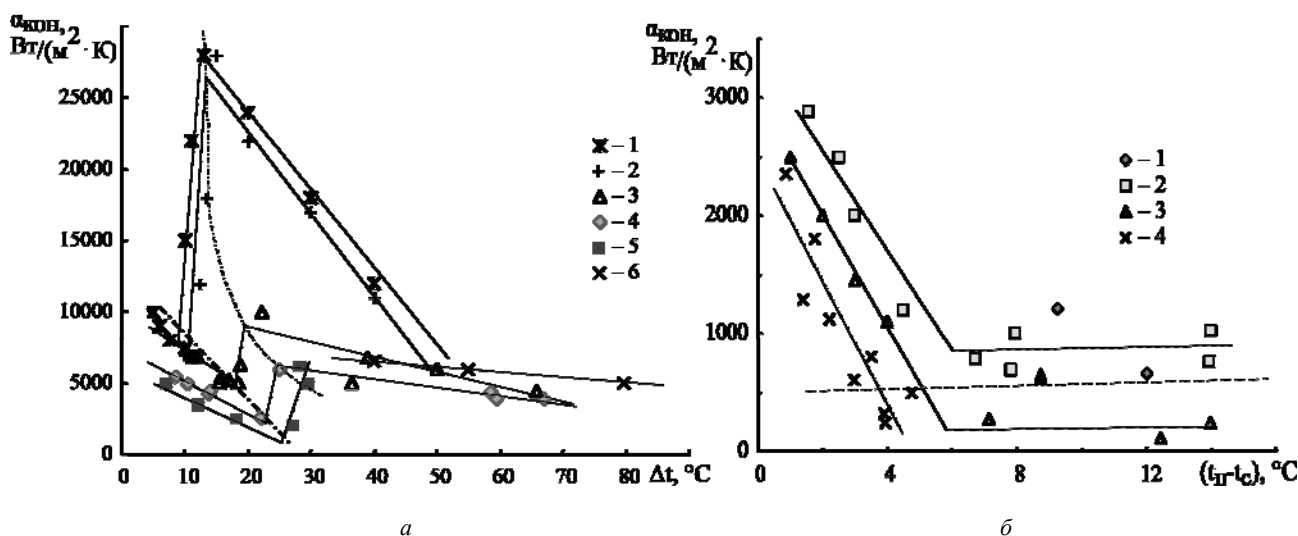


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи на поверхности теплообменника (а) и на верхних пластинах (б) при конденсации паровой смеси от разности температур:
а – экспериментальные точки (1–5): 1 и 2 данные [19] – при концентрации этанола в парах 12 и 14 % мас.; 3–6 данные авторов: 3 – 20 % мас.; 4 – 50 % мас.; 5 – 60 % мас.; 6 – 78–80 % мас. Штрихпунктирные линии – смена режима;
б – экспериментальные точки (1–4): 1 при концентрации этанола 1 – 7 % мас.; 2 – 35 % мас.; 3 – 50 % мас.; 4 – 70 % мас.

Экспериментальные значения расхода испарившихся паров $G_{\text{исп}}$ с поверхности верхней пластины в зависимости от концентрации этанола представлены на рис. 4, а. Как установлено, с увеличением теплоты парообразования или снижения летучести указанный расход снижается.

Следует отметить, что на интенсивность испарения влияют не только теплофизические параметры паровой смеси, но и переохлаждение конденсата на поверхности змеевика, неравномерность орошения и удельная тепловая нагрузка конденсирующихся паров.

Вследствие испарения с поверхности пластины и парциальной конденсации под пластиной происходит изменение концентрации легколетучего компонента по высоте ступени, характерные полученные данные показаны на рис. 4, б.

Для анализа работы пластин на контактной ступени осуществлено измерение температуры паров и конденсата на контактной ступени. Установлено, что конденсат, образованный на поверхности пластины, имеет пониженную температуру в сравнении температурой насыщенных паров. Величина температуры стенки пластины оказалась ниже, чем температура

входящих паров, но выше температуры конденсата на ступени. Снижение температуры конденсата на пластине, в сравнении с температурой конденсирующих паров, обусловлено испарением жидкости.

Результаты исследования гидравлического сопротивления тарелки в зависимости от удельного расхода пара (газа) представлены на рис. 5. Выявлено два гидродинамических режима: слабые и сильные взаимодействия, разграниченные на рисунке штрихпунктирной линией. При дальнейшем увеличении расхода наблюдается подвисание жидкости на насадке и ее выдавливание с образованием брызгоуноса и дальнейшей потерей работоспособности контактного устройства.

Как установлено, с увеличением высоты слоя насадки и ее ширины, гидравлическое сопротивление несмоленной тарелки возрастает. Повышение плотности орошения жидкости приводит к росту гидравлического сопротивления устройства. Согласно полученным данным, гидравлическое сопротивление тарелки перекрестного тока для всех исследованных типов насадки не превышает 320 Па, что ниже в сравнении с колпачковыми и клапанными тарелками [22].

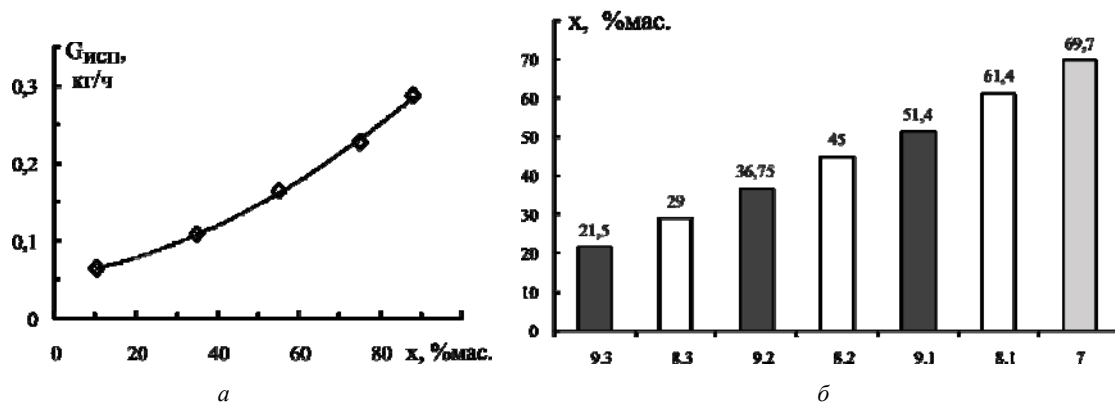


Рис. 4. Изменение расхода паров конденсата с поверхности верхней пластины от концентрации этанола (а) и распределение концентрации этанола на верхних и нижних пластинах (б)

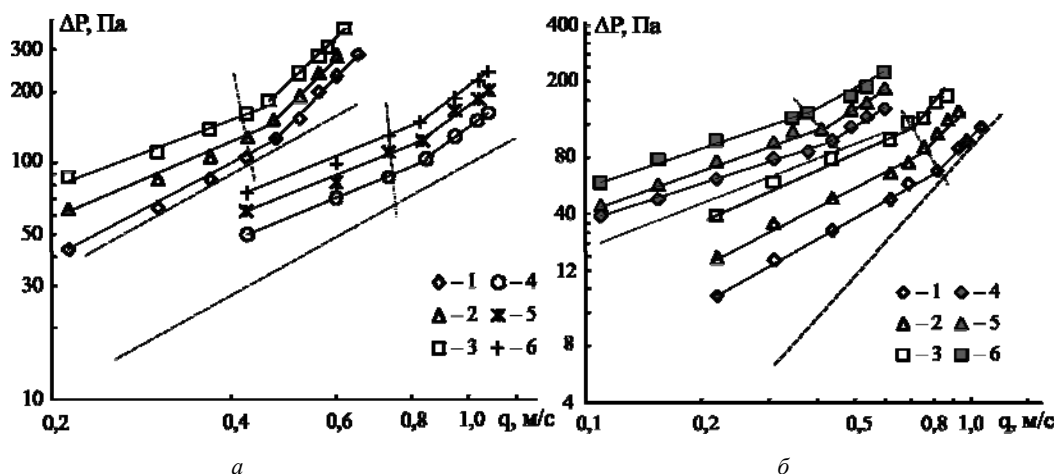


Рис. 5. Зависимость перепада давления контактной ступени от удельного расхода для спирально-призматической (а) и регулярной (б) насадок:

Пунктирные линии – сухая контактная ступень; а – экспериментальные точки (1–6): (1–3) при высоте насадки $h = 90$ мм, ширине $b = 40$ мм, расход жидкости 1 – $1,27 \cdot 10^{-5}$ м³/с; 2 – $1,83 \cdot 10^{-5}$ м³/с; 3 – $3 \cdot 10^{-5}$ м³/с; точки (4–6) при $h = 45$ мм, $b = 40$ мм, расход жидкости 4 – $1,20 \cdot 10^{-5}$ м³/с; 5 – $2,46 \cdot 10^{-5}$ м³/с; 6 – $4,59 \cdot 10^{-5}$ м³/с;

б – экспериментальные точки (1–6): (1–3) при $h = 50$ мм, $b = 18$ мм, расход жидкости 1 – $0,8 \cdot 10^{-5}$ м³/с; 2 – $2,6 \cdot 10^{-5}$ м³/с; 3 – $3,8 \cdot 10^{-5}$ м³/с; точки (4–6) при $h = 100$ мм, $b = 25$ мм, расход жидкости 4 – $0,9 \cdot 10^{-5}$ м³/с; 5 – $2,3 \cdot 10^{-5}$ м³/с; 6 – $3,6 \cdot 10^{-5}$ м³/с

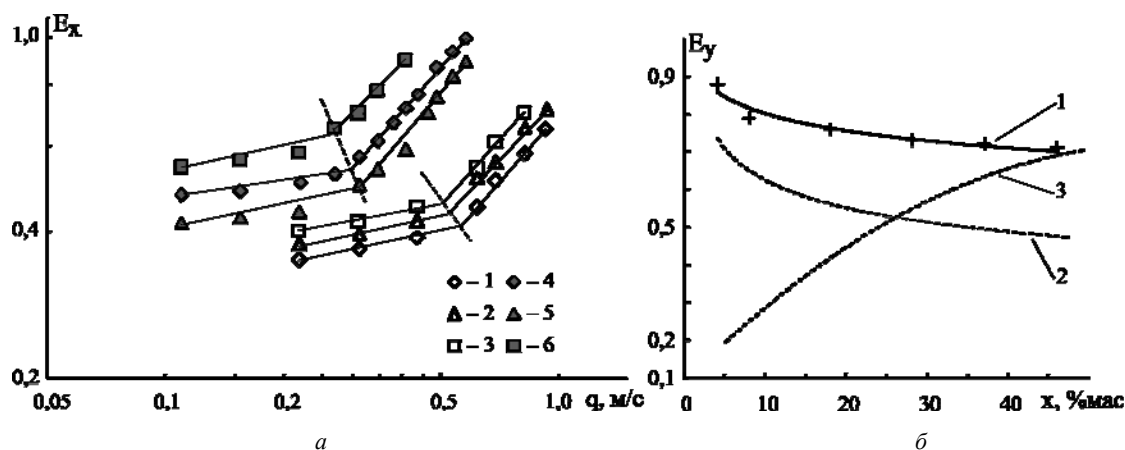


Рис. 6. Эффективности контактной ступени в зависимости от удельной нагрузки (а) и от концентрации этанола в смеси (б) при флегмовом числе $R = 3$:

а – экспериментальные точки (1–6): (1–3) при $h = 50$ мм, $b = 18$ мм, расход жидкости 1 – $0,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; 2 – $2,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; 3 – $3,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; точки (4–6) при $h = 100$ мм, $b = 25$ мм, расход жидкости 4 – $0,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; 5 – $2,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; 6 – $3,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; б – линии (1–3): 1 – контактное устройство, согласно рис. 2, б; 2 – контактное устройство без пластин; 3 – контактное устройство без насадки

Характерные значения эффективности контактной ступени представлены на рис. 6. Эффективность зависит как от режима взаимодействия пара с жидкостью, рис. 6, а, так и от концентрации легколетучего компонента, рис. 6, б. Таким образом, эффективность разработанного устройства для укрепления паров этанола составила от 0,75 до 0,9.

Сравнение показателей насадочной адиабатической колонны диаметром 0,2 м со спирально-призматической насадкой противоточного тока, представленной в работе [23], с установкой с разработанными контактными устройствами, показало преимущество последней. Достигнуто увеличение фактора скорости по сечению колонны до 0,9, вместо 0,5. Снижение гидравлического сопротивления с 4000 Па до 2640 Па и уменьшение удерживающей способности с 1,1 кг до 0,2 кг, массы насадки с 71 кг до 16 кг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокая эффективность контактной ступени и ее низкая металлоемкость позволяет рекомендовать диабатические ректификационные колонны для работы под вакуумом при разделении смесей в технологиях переработки растительного сырья.

Представленные данные были использованы при расчете ректификационных колонн для получения скипидара и абсолютированного этанола.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Владимирова Т. М., Соколов О. М., Третьяков С. И. Моделирование процесса ректификации и парциальной конденсации при разделении таллового масла // Лесной журнал. 2006. № 3. С. 151–153.
2. Селянина Л. И. Получение концентрата пальмитиновой кислоты на установке парциальной конденсации // Лесной журнал. 1999. № 5. С. 82–86.
3. Пленочная тепло- и массообменная аппаратура (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии) / В. М. Олевский, В. Р. Ручинский, А. М. Кашников, В. И. Чернышев. М.: Химия, 1988. 240 с.

4. Тюрмина Е. С., Ильичев И. С., Радбиль А. Б., Семеньева Л. Л., Лазарев М. А., Маврина Е. А., Шалашова А. А. Очистка сульфатного скипидара-сырца от серосодержащих соединений // Лесной журнал. 2017. № 1. С. 177–185.

5. Lopez-Saucedo E. S., Grossmann I. E., Segovia-Hernandez J. G., Hernández S. Rigorous modelling, simulation, and optimization of a conventional and nonconventional batch reactive distillation column: A comparative study of dynamic optimization approaches. Chemical Engineering Research and Design. 2016. Т. 111. С. 83–99. [Google Scholar] [CrossRef].

6. Comparison of heterogeneous azeotropic distillation and energy-saving extractive distillation for separating the acetonitrile-water mixtures / J. Qi, Y. Li, J. Xue, R. Qiao, Z. Zhang, Q. Li // Separation and Purification Technology. 2020. Т. 238. С. 116487. [Google Scholar] [CrossRef].

7. Kiss A. A., Smith R. Rethinking energy use in distillation processes for a more sustainable chemical industry // Energy. 2020. Т. 203. С. 117788. [Google Scholar] [CrossRef].

8. Jana A. K. An internal thermal integration arrangement for multicomponent batch rectifier: Introducing vapor recompression mechanism // Chemical Engineering and Processing-Process Intensification. 2022. Т. 180. С. 108771. [Google Scholar] [CrossRef].

9. Ray S., Das G. Column and Column Internals for Gas-Liquid and Vapour-Liquid Contacting // Process Equipment and Plant Design. 2020. Pp. 427–523. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814885-3.00014-2>.

10. Overview of Methods to Control the Liquid Distribution in Distillation Columns with Structured Packing: Improving Separation Efficiency / A. N. Pavlenko, N. I. Pecherkin, V. E. Zhukov, G. Meski, P. Houghton // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 132. P. 110092. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110092>.

11. Concentric Heat Integrated Distillation Column (HIDiC): a New Specific Packing Design, Characterization and Pre-Industrial Pilot Unit Validation /

M. Marin-Gallego, B. Mizzi, D. Rouzineau, C. Gourdon, M. Meyer // *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. 2022. Vol. 171. 108643. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108643>.

12. Voinov N. A., Bogatkova A. V., Zemtsov D. A. Intensification of heat and mass transfer in a diabatic column with vortex trays // *ChemEngineering*. 2022. Vol. 6, № 2. 29. <https://doi.org/10.3390/chemengineering6020029>.

13. A study of diabatic distillation in a column with a low pressure drop / N. Voinov, D. Zemtsov, N. Deryagina, A. Bogatkova, O. Zhukova // *Chemical Engineering Research and Design*. 2022. Vol. 185. P. 10.1016/j.cherd.2022.06.033.

14. Земцов Д. А., Войнов Н. А. Укрепляющая колонна на основе эффектов термической ректификации // *Хвойные бореальной зоны*. 2015. Т. 33, № 3–4. С. 153–155.

15. Войнов Н. А., Земцов Д. А., Жукова О. П. Исследование термической ректификации в колонне с низким массообменом на ступенях // *Теоретические основы химической технологии*. 2017. Т. 51, № 2. С. 174–181.

16. Патент № 2803963 Российская Федерация. МПК B01D 3/18 (2006.01). Контактная ступень колонны термической ректификации : № 2022132690: заявл. 14.12.2022 : опубл. 25.09.2023 / Войнов Н. А., Земцов Д. А.; заявитель СибГУ им. М. Ф. Решетнева. 6 с.: ил.

17. Патент № 2755176 РФ, МПК B01D 3/26. Контактная ступень колонны термической ректификации : № 2020137862 : заявл. 17.11.2020 : опубл. 13.09.2021 / Н. А. Войнов, Д. А. Земцов, О. П. Жукова, Н. В. Дерягина; заявитель СибГУ им. М. Ф. Решетнева. 6 с.: ил.

18. Патент № 2817641 Российская Федерация. МПК B01D 3/20 (2006.01). Контактная ступень колонны термической ректификации : № 2023111754: заявл. 03.05.2023 : опубл. 17.04.2024 / Войнов Н. А., Земцов Д. А., Богаткова А. В., Чернов В. А.; заявитель СибГУ им. М. Ф. Решетнева. 6 с.: ил.

19. Чиндяков А. А., Смирнов Ю. Б. Теплообмен при псевдокапельной конденсации паровой смеси вода-этанол на гладких и оребренных трубах // *Вестник МЭИ*. 2013. № 1. С. 46–54.

20. Чиндяков А. А., Смирнов Ю. Б. Обобщение опытных данных по теплообмену при псевдокапельной конденсации паровой смеси вода-этанол на трубах // *Вестник МЭИ*. 2014. № 2. С. 19–23.

21. Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : пособие для вузов ; под ред. чл.-корр. РАН П. Г. Романкова. 12-е изд. М. : ООО ТИД «Альянс», 2005. 576 с.

22. Контактные насадки промышленных тепло-массообменных аппаратов : монография / А. М. Коган, А. Г. Лаптев, А. С. Пушинов, М. И. Фарахов ; под ред. А. Г. Лаптева. Казань : Отечество, 2013. 454 с.

23. Ректификация этилового спирта в колоннах со спирально-призматической насадкой / Н. А. Войнов, О. П. Жукова, А. Н. Войнов, В. А. Паньков // *Техника и технология пищевых производств*. 2012. № 4 (27). С. 95–99.

REFERENCES

1. Vladimirova T. M., Sokolov O. M., Tret'yakov S. I. Modelirovanie processa rektifikacii i parcial'noj kondensacii pri razdelenii tallovogo masla // *Lesnoj zhurnal*. 2006. № 3. S. 151–153.

2. Selyanina L. I. Poluchenie koncentrata pal'mitino-voj kisloty na ustanovke parcial'noj kondensacii // *Lesnoj zhurnal*. 1999. № 5. S. 82–86.

3. Plenoch'naya teplo- i massoobmennaya apparatura (Processy i apparaty himicheskoy i neftekhimicheskoy tekhnologii) / V. M. Olevskij, V. R. Ruchinskij, A. M. Kashnikov, V. I. Chernyshev. M. : Himiya, 1988. 240 s.

4. Ochistka sul'fatnogo skipidara-syrca ot serasoder-zhashchih soedinenij / E. S. Tyurmina, I. S. Il'ichev, A. B. Radbil', L. L. Semenycheva, M. A. Lazarev, E. A. Mavrina, A. A. Shalashova // *Lesnoj zhurnal*. 2017. № 1. S. 177–185.

5. Lopez-Saucedo E. S., Grossmann I. E., Segovia-Hernandez J. G., Hernández S. Rigorous modelling, simulation, and optimization of a conventional and nonconventional batch reactive distillation column: A comparative study of dynamic optimization approaches. *Chemical Engineering Research and Design*. 2016. T. 111. C. 83–99. [Google Scholar] [CrossRef].

6. Comparison of heterogeneous azeotropic distillation and energy-saving extractive distillation for separating the acetonitrile-water mixtures / J. Qi, Y. Li, J. Xue, R. Qiao, Z. Zhang, Q. Li // *Separation and Purification Technology*. 2020. T. 238. C. 116487. [Google Scholar] [CrossRef].

7. Kiss A. A., Smith R. Rethinking energy use in distillation processes for a more sustainable chemical industry // *Energy*. 2020. T. 203. C. 117788. [Google Scholar] [CrossRef].

8. Jana A. K. An internal thermal integration arrangement for multicomponent batch rectifier: Introducing vapor recompression mechanism // *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*. 2022. T. 180. – C. 108771. [Google Scholar] [CrossRef].

9. Ray S, Das G. Column and Column Internals for Gas–Liquid and Vapour–Liquid Contacting // *Process Equipment and Plant Design*. 2020. Pp. 427–523. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814885-3.00014-2>.

10. Overview of Methods to Control the Liquid Distribution in Distillation Columns with Structured Packing: Improving Separation Efficiency / A. N. Pavlenko, N. I. Pecherkin, V. E. Zhukov, G. Meski, P. Houghton // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 132. P. 110092. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110092>.

11. Concentric Heat Integrated Distillation Column (HIDiC): a New Specific Packing Design, Characterization and Pre-Industrial Pilot Unit Validation / M. Marin-Gallego, B. Mizzi, D. Rouzineau, C. Gourdon, M. Meyer // *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. 2022. Vol. 171. 108643. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108643>.

12. Voinov N. A., Bogatkova A. V., Zemtsov D. A. Intensification of heat and mass transfer in a diabatic column with vortex trays // *ChemEngineering*. 2022. Vol. 6, № 2. 29. <https://doi.org/10.3390/chemengineering6020029>.

13. A study of diabatic distillation in a column with a low pressure drop / N. Voinov, D. Zemtsov, N. Deryagina, A. Bogatkova, O. Zhukova // Chemical Engineering Research and Design. 2022. Vol. 185. P. 10.1016/j.cherd.2022.06.033.

14. Zemcov D. A., Vojnov N. A. Ukreplyayushchaya kolonna na osnove effektiv termicheskoy rektifikatsii // Hvojnye boreal'noj zony. 2015. T. 33, № 3–4. S. 153–155.

15. Vojnov N. A., Zemcov D. A., Zhukova O. P. Issledovanie termicheskoy rektifikatsii v kolonne s nizkim massoobmenom na stupenyah // Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii. 2017. T. 51, № 2. S. 174–181.

16. Patent № 2803963 Rossijskaya Federaciya. MPK B01D 3/18 (2006.01). Kontaktnaya stupen' kolonny termicheskoy rektifikatsii : № 2022132690: zayavl. 14.12.2022 : opubl. 25.09.2023 / Vojnov N. A., Zemcov D. A.; zayavitel' SibGU im. M. F. Reshetneva. 6 s.: il.

17. Patent № 2755176 RF, MPK B01D 3/26. Kontaktnaya stupen' kolonny termicheskoy rektifikatsii: № 2020137862: zayavl. 17.11.2020 : opubl. 13.09.2021 / N. A. Vojnov, D. A. Zemcov, O. P. Zhukova, N. V. Deryagina; zayavitel' SibGU im. M. F. Reshetneva. 6 s.: il.

18. Patent № 2817641 Rossijskaya Federaciya. MPK B01D 3/20 (2006.01). Kontaktnaya stupen' kolonny termicheskoy rektifikatsii : № 2023111754: zayavl. 03.05.2023 : opubl. 17.04.2024 / Vojnov N. A., Zemcov D. A.,

Bogatkova A. V., Chernov V. A.; zayavitel' SibGU im. M. F. Reshetneva. 6 s.: il.

19. Chindyakov A. A., Smirnov Yu. B. Teploobmen pri psevdokapel'noj kondensatsii parovoj smesi voda-etanol na gladkih i orebrennyh trubah // Vestnik MEI. 2013. № 1. S. 46–54.

20. Chindyakov A. A., Smirnov Yu. B. Obobshchenie opytных dannyh po teploobmenu pri psevdokapel'noj kondensatsii parovoj smesi voda-etanol na trubah // Vestnik MEI. 2014. № 2. S. 19–23.

21. Primery i zadachi po kursu processov i apparatov himicheskoy tekhnologii : posobie dlya vuzov / K. F. Pavlov, P. G. Romankov, A. A. Noskov ; pod red. chl.-korr. RAN P. G. Romankova. 12-e izd. M. : OOO TID «Al'yans», 2005. 576 s.

22. Kontaktnye nasadki promyshlennyh teplomasso-obmennyh apparatov: monografiya / A. M. Kagan, A. G. Laptev, A. S. Pushnov, M. I. Farahov; pod red. A. G. Lapteva. Kazan' : Otechestvo, 2013. 454 s.

23. Rektifikatsiya etilovogo spirta v kolonnah so spiral'no-prizmaticheskoy nasadkoj / N. A. Vojnov, O. P. Zhukova, A. N. Vojnov, V. A. Pan'kov // Tekhnika i tekhnologiya pishchevyh proizvodstv. 2012. № 4 (27). S. 95–99.

© Чернов В. А., Кожухова Н. Ю., Жукова О. П., Войнов Н. А., 2025

Поступила в редакцию 18.06.2025
Принята к печати 04.08.2025

ПОЛУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАКТЕРИАЛЬНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ В КАЧЕСТВЕ КОМПОЗИТНОГО СЫРЬЯ

Е. А. Рогова, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: kat-rogo@yandex.ru

Аннотация. Сырьевая база для целлюлозно-бумажной промышленности имеет очень широкий спектр. Но, не смотря на это, основным сырьем по-прежнему остаются волокна растительного происхождения (древесина хвойных и лиственных пород, однолетние растения), что негативно влияет на экологию в целом. Из-за широкого диапазона применения продукции целлюлозно-бумажного производства, производители готовой продукции все чаще применяют композиции из волокон различного происхождения, производя замену от 1 до 90 % растительных волокон. Это позволяет сократить расход волокон растительного происхождения, что в свою очередь благоприятно влияет на экологическую обстановку.

В настоящее время все больший интерес проявляется к волокнам, имеющим бактериальное происхождение, так называемая бактериальная целлюлоза (БЦ), которая в композиции с волокнами растительного происхождения, позволяет получить готовый продукт с различными характеристиками и различным назначением.

В исследовании представлены результаты получения композиционного сырья из волокон хвойных пород древесины и БЦ для целлюлозно-бумажного производства; представлены результаты физико-механических испытаний готовой продукции.

Ключевые слова: бактериальная целлюлоза, целлюлоза из хвойных пород древесины, композиционные материалы, биореактор для получения бактериальной целлюлозы, композиционные материалы, композиционные материалы с применением бактериальной целлюлозы.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 4, P. 93–97

PRODUCTION AND USE OF BACTERIAL CELLULOSE AS A COMPOSITE RAW MATERIAL

E. A. Rogova, Y. D. Alashkevich, V. A. Kozhukhov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: kat-rogo@yandex.ru

Annotation. The raw material base for the pulp and paper industry has a very wide range. However, despite this, the main raw materials are still plant fibers (coniferous and deciduous wood, annual plants), which negatively affects the environment as a whole. Due to the wide range of applications of pulp and paper products, manufacturers of finished products are increasingly using fiber compositions of various origins, replacing from 1 to 90 % of plant fibers. This reduces the consumption of plant-based fibers, which in turn has a beneficial effect on the environmental situation.

Currently, there is increasing interest in fibers of bacterial origin, the so-called bacterial cellulose (BC), which, in combination with fibers of plant origin, makes it possible to obtain a finished product with different characteristics and different purposes.

The study presents the results of obtaining composite raw materials from softwood fibers and BC for pulp and paper production; the results of physico-mechanical tests of finished products are presented.

Keywords: bacterial cellulose, softwood cellulose, composite materials, bioreactor for the production of bacterial cellulose, composite materials, composite materials using bacterial cellulose.

ВВЕДЕНИЕ

Целлюлоза – это волокнистый материал, который по своей природе является нерастворимым в воде полимером. Целлюлоза играет важную роль в поддержании структуры стенок растительных клеток. Более того, целлюлоза является биоразлагаемым, биосовместимым и возобновляемым природным полимером и, следовательно, считается альтернативой неразла-

гаемым полимерам на основе ископаемого топлива. Возможности технологического использования целлюлозы огромны, однако, получение чистой целлюлозы, т. е. отделение ее от корковых компонентов, требует химической обработки, которая не является экологически чистой, нерентабельной и требует большого количества энергии. Растения являются основным источником целлюлозы, но в настоящее время

альтернативным источником целлюлозы являются бактерии из-за растущего спроса на производные растительной целлюлозы, что привело к увеличению потребления древесины в качестве сырья, что также привело к вырубке лесов и глобальной экологической проблеме. Помимо растений, некоторые микроорганизмы обладают способностью производить целлюлозу. БЦ была открыта Брауном в 1886 году. Он идентифицировал рост неразветвленной пленки с химически эквивалентной структурой, как у растительной целлюлозы. БЦ представляет собой органическое соединение, вырабатываемое определенными типами бактерий, такими как *Acetobacter xylinum*, *Acetobacter*, *Rhizobium*, *Agrobacterium*, *Azotobacter*, *Pseudomonas*, *Salmonella*, а также грамположительными бактериями, такими как *Sarcina ventriculi* и в настоящее время ведется поиск бактерий с помощью которых можно получать БЦ. Молекулярная формула БЦ – $(C_6H_{10}O_5)_n$, она имеет связь β -1,4 между двумя молекулами глюкозы, которая такая же, как у растительной целлюлозы, но отличается физическими и химическими характеристиками, такими как высокоупорядоченная структура этих целлюлоз [1]. В отличие от растительной целлюлозы, БЦ не содержит лигнина, гемицеллюлоз и экстрактивных веществ и характеризуется высокой чистотой. БЦ можно получить путем культивирования штамма *Acetobacter xylinum*, который обычно встречается на фруктах, гниющих фруктах, овощах, уксусе, фруктовых соках и алкогольных напитках.

Благодаря своей биосовместимости, БЦ используется во многих областях: пищевая промышленность [2; 3], медицина [4; 5], суперсорбенты [6], биоупаковка [7], биобетоны [8]. Кроме того, наноструктура БЦ и наличие большого количества свободных гидроксильных групп делают ее превосходным биоматериалом для использования в целлюлозно-бумажной промышленности. Коллектив авторов [9], провел исследования по получению фильтрационной бумаги из целлюлозы хвойных пород древесины (ХЦ) и БЦ. Диапазон исследованных композиций очень широкий от 0 до 100 % БЦ, через каждые 10 %, но пропущены точки 20, 40 и 80 % БЦ. Также в исследовании участвовала ХЦ не прошедшая никакой механической обработки при начальной степи помола 32 °ШР. БЦ используемая в исследовании была получена статическим методом. В исследовании приведены наиболее значимые результаты при композиции 80 % ХЦ и 20 % БЦ.

Авторы исследования [10] также применяли композицию из ХЦ и БЦ, при этом провели механическую обработку ХЦ, до степени помола в 35°ШР, 45°ШР и 55°ШР, без указания способа обработки. В композицию была добавлена БЦ полученная статическим методом в диапазоне от 0 до 6 %, через 1 %. Представленные результаты, показали уменьшение разрушающего усилия с увеличением БЦ в композиции.

Проанализировав, вышеуказанные исследования была поставлены задачи:

– провести механическую обработку ХЦ с указанием метода и параметров размола;

– получить БЦ динамическим способом в виде гель-пленки с помощью аппарата [11] и использовать ее для получения композиции с ХЦ;

– получить готовый продукт из композиции ХЦ и БЦ в диапазоне 0–50 % и изучить их физико-механические свойства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

ХЦ была предоставлена ОАО «Группа «Илим» г. Братск с начальной степенью помола 12°ШР. Размол производился на дисковой мельнице, с использованием гарнитуры [12], форма межножевой полости с прямолинейной формой ножей, при концентрации волокнистой массы 2 %, межножевом зазоре 0,2 мм, частоте вращения ротора 2000 об/мин. Размол проводили до степени помола 45 °ШР, 60 °ШР, 75 °ШР по Шоппер–Риглеру.

БЦ была получена в биореакторе [11] совместно с институтом Биофизики СО РАН в городе Красноярск. Синтез бактериальной целлюлозы осуществлялся штаммом *Komagataeibacter Xylinum* в течение 12 суток. Среда для синтеза БЦ – Хестрина и Шрамма в объеме 1 литр. Исходная концентрация глюкозы 30 г/л, на 5 сутки в среду была введена дополнительная глюкоза в количестве 30 грамм. Частота вращения ротора 2 об/мин. Для получения БЦ в виде гель-пленки в биореактор был помещен цилиндрический пластиковый ротор [13].

Полученная гель-пленка БЦ была разбита на волокна с помощью высокоскоростного разбивателя HURAKAN HKN-HBN830 при скорости 25000 об/мин.

В ходе проведения исследования использовались следующие методы:

1. Измерение степени помола по Шоппер–Риглеру проводилось в соответствии с ISO 5267–1 (1999) [14].

2. Измерение показателя разрывной длины проводилось в соответствии с ГОСТ ИСО 1924–1–96 [15].

3. Измерение числа двойных перегибов определялось в соответствии с ГОСТ 13525.2–80 [16].

4. Определение показателя сопротивления продавливанию проводилось в соответствии с ГОСТ 13525.8–86 [17].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Что бы исследовать закономерности изменений физико-механических свойств готовой продукции, были изготовлены опытные образцы отливок из 100 % ХЦ при различных степенях помола. Затем была составлена композиция из БЦ и ХЦ в следующем процентном соотношении БЦ/ ХЦ: 10/90, 20/80, 30/70, 40/60, 50/50.

Образцы готовой продукции из композиции БЦ/ ХЦ были выполнены в соответствии с требованиями [18] и определены их физико-механические характеристики, закономерности которых показаны на рисунках (рис. 1–3).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

На рис. 1 представлена зависимость сопротивления излому (число двойных перегибов) от % соотношения БЦ при использовании в качестве основного

компонента сырья целлюлозы из хвойных пород древесины размолотой до 45 °ШР, 60 °ШР, 75 °ШР. Что касается количественных значений, то величина сопротивления излому равномерно увеличивается по показательной функции с увеличением % роста БЦ. Средний процент прироста показателя при добавлении каждых 10 % БЦ в композицию, колеблется в пределах 8–14 % не зависимо от степени помола. В то время как при добавлении в композицию 50 % БЦ, показатель вырастает в среднем на 60 % относительно первоначального значения 100 % ХЦ не зависимо от степени помола.

На рис. 2 представлена зависимость сопротивления продавливанию от % соотношения БЦ при ис-

пользовании в качестве основного компонента сырья целлюлозы из хвойных пород древесины размолотой до 45 °ШР, 60 °ШР, 75 °ШР. Как видно из графиков, зависимости качественных показателей, они представляют собой показательные зависимости. Количественные значения показателя, для каждой степени помола происходят равномерно. Средний процент прироста показателя при добавлении каждых 10 % БЦ в композицию, колеблется в пределах 5–12 % не зависимо от степени помола. В то время как при добавлении в композицию 50 % БЦ, показатель вырастает в среднем на 57 % относительно первоначального значения 100 % ХЦ не зависимо от степени помола.

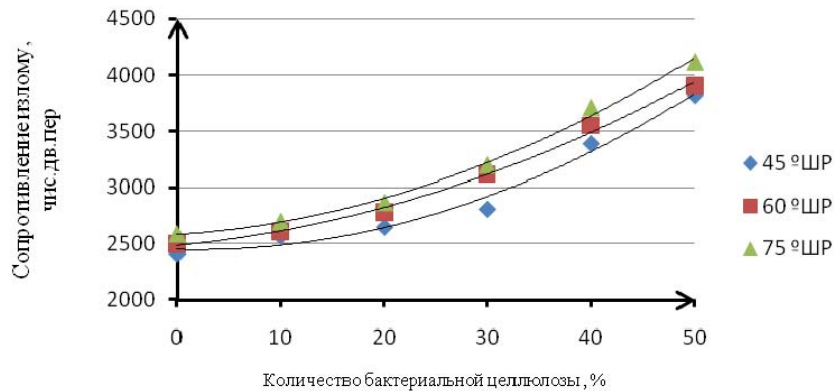


Рис. 1. Зависимость сопротивления излому от % бактериальной целлюлозы в композиции

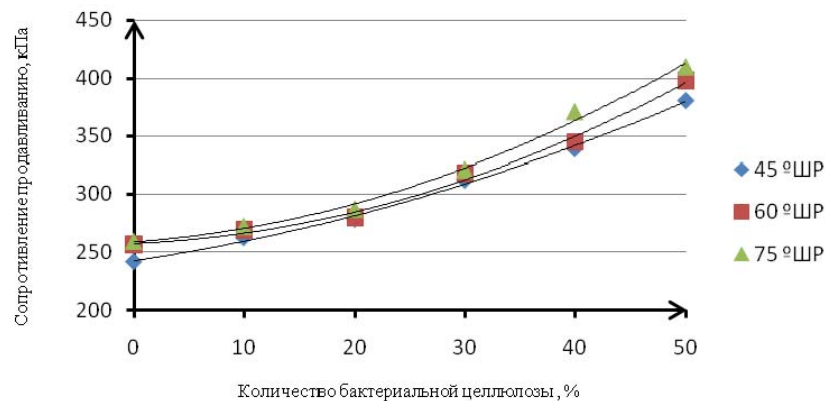


Рис. 2. Зависимость сопротивления продавливанию от % бактериальной целлюлозы в композиции

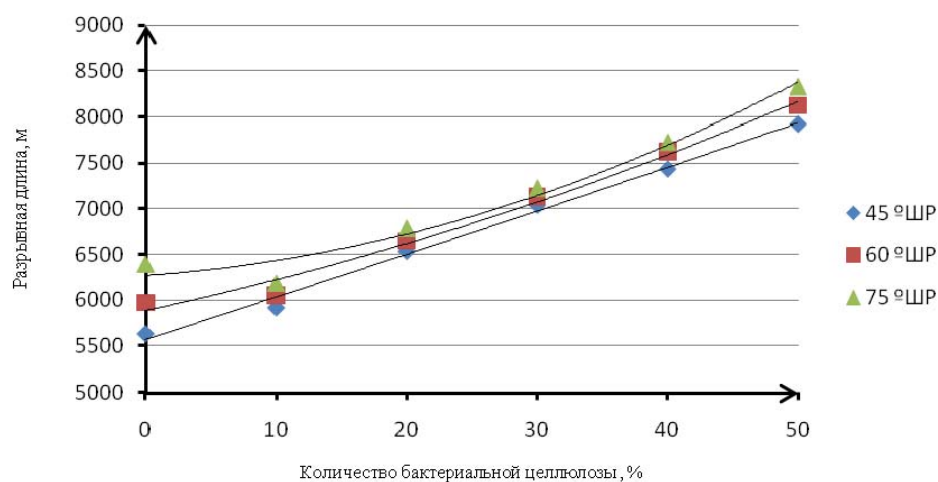


Рис. 3. Зависимость изменения разрывной длины от % бактериальной целлюлозы в композиции

На рис. 3 представлена зависимость изменения разрывной длины от % соотношения БЦ при использовании в качестве основного компонента сырья целлюлозы из хвойных пород древесины размолотой до 45 °ШР, 60 °ШР, 75 °ШР. Как видно из графиков, зависимости качественных показателей близки к линейным зависимостям. Количественные значения показателя, для каждой степени помола, так же происходит равномерно. Средний процент прироста показателя при добавлении каждых 10 % БЦ в композицию, колеблется в пределах 5–10 % не зависимо от степени помола. В то время как при добавлении в композицию 50 % БЦ, показатель вырастает в среднем на 35 % относительно первоначального значения 100 % ХЦ не зависимо от степени помола.

ВЫВОДЫ

Как видно из результатов исследования физико-механические характеристики готовых изделий изменяются от количества БЦ в композиции, причем для показателя сопротивления излому и сопротивления продавливанию, качественный прирост осуществляется по показательной зависимости. Что касается показателя разрывной длины, то качественная зависимость для него носит линейный характер.

Выяснилось, что изменение физико-механических характеристик практически не зависят от прироста степени помола, изменение этих характеристик колеблется в пределах от 5 до 10 % для каждого показателя.

В целом благодаря добавлению БЦ в композицию с ХЦ получается готовая продукция с различным спектром физико-механических характеристик, что позволит применить данную продукцию в широком диапазоне. Благодаря минимальной механической обработке ХЦ и добавления в композицию БЦ можно получать готовую продукцию высокой прочности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Состояние и перспективы совершенствования способов получения и использования бактериальной целлюлозы (обзор) / Е. А. Рогова, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов, И. Р. Лапин, Е. Г. Киселев, // Химия растительного сырья. 2022. № 4. С. 27–46. DOI 10.14258/jcprm.20220411373.
2. Sukara E., Meliawati R. Potential Values of BacteriaL Cellulose for industrial applications // Jurnal Selulosa. 2014. Vol. 4. № 1. Pp. 7–16.
3. Okiyama A., Motoki M., Yamanaka S. Bacterial cellulose II. Processing of the gelatinous cellulose for food materials // Food Hydrocoll. 1992. № 6. Pp. 479–487.
4. Bacterial cellulose-MMTs nanoreinforced composite films: novel wound dressing material with antibacterial properties / M. Ul-Islam, T. Khan, W. A. Khat-tak, J. K. Park // Cellulose. 2013. № 20 Pp. 589–596.
5. Bacterial Cellulose Hydrogel Loaded with Lipid Nanoparticles for Localized Cancer Treatment / M. Caci-cedo, G. A. Islan, I. Leon, V. A. a Alvarez // Colloids and surfaces B: Biointerfaces. 2018. Vol. 170. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2018.06.056.
6. Сорбенты на основе бактериальной целлюлозы для выделения Sr, U, Pu и Am из растворов / Н. А. Аты-

кян, В. В. Ревин, А. В. Сафонов, Я. Ю. Карасева, И. М. Прошин, В. В. Шутова // Радиохимия. 2021. Т. 63, № 5. С. 476–483.

7. Multifunctional Bio-Nanocomposite Coatings for Perishable Fruits / S. Jung, Y. Cui, M. Barnes, C. Satam, S. Zhang, R. A. Chowdhury, A. Adumbumkulath, O. Sahin, C. Miller, S. M. Sajadi, L. M. Sassi, Y. Ji, M. R. Bennett, M. Yu, J. Friguglietti, F. A. Merchant, R. Verduzco, S. Roy, R. Vajtai, J. C. Meredith, J. P. Youngblood, N. Koratkar, M. M. Rahman, P. M. Ajayan // Advanced Materials. 2020. № 32. P. 1908291.

8. Sancheza F., Sobolevb K. Nanotechnology in concrete A review // Construction and Building Materials. 2010. № 24. Pp. 2060–2071.

9. Композиционная бумага из бактериальной наноцеллюлозы и хвойной целлюлозы / Ю. А. Гисматулина, В. В. Будаева, А. Е. Ситникова, Н. В. Бычин, Е. К. Гладышева, Н. А. Шавыркина, Г. Ф. Миронова, Ю. В. Севастьянова // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2021. Т. 11, № 3. С. 460–471.

10. Смирнова Е. Г., Афанасьев М. В., Смирнова Е. Г. Применение материалов, полученных с помощью нанотехнологий, в производстве бумаги // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2009. № 188. С. 240–245.

11. Биореактор для получения бактериальной целлюлозы: пат. 2822177 Рос. Федерация. № 2023115782 / Рогова Е. А. ; заявл. 15.06.23 ; опубл. 02.07.24, Бюл. № 19. 3 с.

12. Размалывающая гарнитура дисковой мельницы : пат. 2314380 Российская Федерация. № 2006121708/12 / Ю. Д. Алашкевич, В. И. Ковалев, М. А. Карбышев [и др.]; заявл. 19.06.2006 ; опубл. 10.01.2008, Бюл. № 1. 9 с.

13. Получение бактериальной целлюлозы в аппарате роторного типа и ее применение в композиционных материалах / Е. А. Рогова, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов, Е. Г. Киселев // BIOAsia Altai 2024 : материалы IV Международного биотехнологического форума, Барнаул, 23–28 сентября 2024 года. Барнаул : Алтайский государственный университет, 2024. С. 190–194.

14. ISO 5267-1:1999/Cor.1:2001. Cellulose. Determination of the ability to dehydrate. Part 1. ShopperRigler Method. 8 p.

15. ГОСТ ИСО 1924-1–96. Бумага и картон. Определение прочности при растяжении. Часть 1. Метод нагружения с постоянной скоростью. Взамен ГОСТ 13525.1–79. Введ. 01.01.2000. Минск : Изд-во стандартов, 2000. 10 с.

16. ГОСТ 13525.2–80. Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Метод определения прочности на излом при многократных перегибах. Взамен ГОСТ 13525.2–68. Введ. 1981–30–06. М. : Стандартиформ, 2007. 4 с.

17. ГОСТ 13525.8–86. Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Метод определения сопротивления продавливанию. Взамен ГОСТ 13525.8–78; ГОСТ 13648.7–78. Введ. 1988–01–01. М. : Стандартиформ, 2007. 6 с.

18. Технология целлюлозно-бумажного производства : справ. материалы. В 3 т. / Всерос. науч.-исслед. ин-т целлюлозно-бумаж. пром-сти (ВНИИБ); [Редкол.:

Осипов П.С. и др.]. СПб. : [Изд-во С.-Петерб. гос. лесотехн. акад. (СПб ЛТА)], 2003. 633 с. ISBN 5-7325-0708-6.

19. Рогова Е. А., Кожухов В. А., Алашкевич Ю. Д. Изменение качественных показателей бумаги из вторичного волокна в композиции с бактериальной целлюлозой // Хвойные бореальной зоны. 2024. Т. 42, № 2. С. 95–99. DOI 10.53374/1993-0135-2024-2-95-99.

REFERENCES

1. Sostoyanie i perspektivy sovershenstvovaniya sposobov polucheniya i ispol'zovaniya bakterial'noj cellyulozy (obzor) / E. A. Rogova, Yu. D. Alashkevich, V. A. Kozhuhov, I. R. Lapin, E.G. Kiselev // Himiya rastitel'nogo syr'ya. 2022. № 4. S. 27–46. DOI 10.14258/jepm.20220411373.
2. Sukara E., Meliawati R. Potential Values of BacteriaL Cellulose for industrial applications // Jurnal Selulosa. 2014. Vol. 4. № 1. Pp. 7–16.
3. Okiyama A., Motoki M., Yamanaka S. Bacterial cellulose II. Processing of the gelatinous cellulose for food materials // Food Hydrocoll. 1992. № 6. Pp. 479–487.
4. Bacterial cellulose-MMTs nanoreinforced composite films: novel wound dressing material with antibacterial properties / M. Ul-Islam, T. Khan, W. A. Khattak, J. K. Park // Cellulose. 2013. № 20 Pp. 589–596.
5. Bacterial Cellulose Hydrogel Loaded with Lipid Nanoparticles for Localized Cancer Treatment / M. Cacicedo, G. A. Islan, I. Leon, V. A. a Alvarez // Colloids and surfaces B: Biointerfaces. 2018. Vol. 170. DOI:10.1016/j.colsurfb.2018.06.056.
6. , Sorbenty na osnove bakterial'noj cellyulozy dlya vydeleniya Sr, U, Pu i Am iz rastvorov / N. A. Atykyan, V. V. Revin, A. V. Safonov, Ya. Yu. Karaseva, I. M. Proshin, V. V. Shutova // Radiohimiya. 2021. Т. 63, № 5. С. 476–483.
7. Multifunctional Bio-Nanocomposite Coatings for Perishable Fruits / S. Jung, Y. Cui, M. Barnes, C. Satam, S. Zhang, R. A. Chowdhury, A. Adumbumkulath, O. Sahin, C. Miller, S. M. Sajadi, L. M. Sassi, Y. Ji, M. R. Bennett, M. Yu, J. Friguglietti, F. A. Merchant, R. Verduzco, S. Roy, R. Vajtai, J. C. Meredith, J. P. Youngblood, N. Koratkar, M. M. Rahman, P. M. Ajayan // Advanced Materials. 2020. № 32. P. 1908291.
8. Sancheza F., Sobolevb K. Nanotechnology in concrete A review // Construction and Building Materials. 2010. № 24. Pp. 2060–2071.
9. Kompozicionnaya bumaga iz bakterial'noj nano-cellyulozy i hvoynoj cellyulozy / Yu. A. Gismatulina, V. V. Budaeva, A. E. Sitnikova, N. V. Bychin, E. K. Gladysheva, N. A. Shavyrkina, G. F. Mironova, Yu. V. Sevast'yanova // Izvestiya vuzov. Prikladnaya himiya i biotekhnologiya. 2021. Т. 11, № 3. S. 460–471.
10. Smirnova E. G., M. V. Afanas'ev, E. G. Smirnova, Primenenie materialov, poluchennyh s pomoshch'yu nanotekhnologij, v proizvodstve bumagi // Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii. 2009. № 188. S. 240–245.
11. Bioreaktor dlya polucheniya bakterial'noj cellyulozy: pat. 2822177 Ros. Federaciya. № 2023115782 / Rogova E. A. ; zayavl. 15.06.23 ; opubl. 02.07.24, Byul. № 19. 3 s.
12. Razmalyvayushchaya garnitura diskovoj mel'nicy: pat. 2314380 Rossijskaya Federaciya. № 2006121708/12 / Yu. D. Alashkevich, V. I. Kovalev, M. A. Karbyshev [i dr.]; zayavl. 19.06.2006 ; opubl. 10.01.2008, Byul. № 1. 9 s.
13. Poluchenie bakterial'noj cellyulozy v apparate rotornogo tipa i ee primeneniye v kompozicionnyh materialah / E. A. Rogova, Yu. D. Alashkevich, V. A. Kozhuhov, E. G. Kiselev // BIOAsia Altai 2024 : materialy IV Mezhdunarodnogo biotekhnologicheskogo foruma, Barnaul, 23–28 sentyabrya 2024 goda. Barnaul : Altajskij gosudarstvennyj universitet, 2024. S. 190–194.
14. ISO 5267-1:1999/Cor.1:2001. Cellulose. Determination of the ability to dehydrate. Part 1. ShopperRigler Method. 8 p.
15. GOST ISO 1924-1–96. Bumaga i karton. Opredeleniye prochnosti pri rastyazhenii. CH. 1: Metod na gruzheniya s postoyannoy skorost'yu. Vzamen GOST 13525.1–79. Vved. 01.01.2000. Minsk : Izd-vo standartov, 2000. 10 s.
16. GOST 13525.2–80. Polufabrikaty voloknistyye, bumaga i karton. Metod opredeleniya prochnosti na izlom pri mnogokratnykh peregibakh. Vzamen GOST 13525.2–68. Vved. 1981–30–06. M. : Standartinform, 2007. 4 s.
17. GOST 13525.8–86. Polufabrikaty voloknistyye, bumaga i karton. Metod opredeleniya soprotivleniya prodavlivaniyu. Vzamen GOST 13525.8–78; GOST 13648.7–78. Vved. 1988–01–01. M. : Standartinform, 2007. 6 s.
18. Tekhnologiya cellyulozno-bumazhnogo proizvodstva : sprav. Materialy. V 3 t. / Vseros. nauch.-issled. int cellyuloz.-bumazh. prom-sti (VNIIB); [Redkol.: Osipov P.S. i dr.]. SPb. : [Izd-vo S.-Peterb. gos. lesotekhn. akad. (SPb LTA)], 2003. 633 s. ISBN 5-7325-0708-6.
19. Rogova E. A., Kozhuhov V. A., Alashkevich Yu. D. Izmeneniye kachestvennyh pokazatelej bumagi iz vtorichnogo volokna v kompozicii s bakterial'noj cellyulozoy // Hvoynye boreal'noj zony. 2024. Т. 42, № 2. С. 95–99. DOI 10.53374/1993-0135-2024-2-95-99.

© Рогова Е. А., Алашкевич Ю. Д.,
Кожухов В. А., 2025

Поступила в редакцию 18.06.2025
Принята к печати 04.08.2025

АВТОРСКАЯ ССЫЛКА

Авдеев А. Г. Разработка импортозамещающего оборудования точного высева семян для выращивания сеянцев с закрытой корневой системой, с. 56–63

Авдеева Е. В. Оценка стабильности развития ассимиляционного аппарата березы повислой методами дендроиндикации (на примере скверов города Красноярска), с. 40–49

Авдеева Е. В., см. Авдеев А. Г.

Алашкевич Ю. Д. Динамика контакта струи суспензии с преградой при размоле растительных полимеров, с. 64–74

Алашкевич Ю. Д., см. Рогова Е. А.

Братилова Н. П. Показатели роста четырехлетнего посадочного материала сосны кедровой сибирской с закрытой и открытой корневой системой, с. 7–12

Буторова О. Ф., см. Матвеева Р. Н.

Васильев А. А., см. Галактионов О. Н.

Войнов Н. А., см. Чернов В. А.

Галактионов О. Н. Изменение запасов древесины при проведении рубок ухода в молодых лесах Прионежского района Республики Карелия, с. 32–39

Гришлова М. В., см. Матвеева Р. Н.

Дырдин С. Н., см. Матвеева Р. Н.

Елхова М. А., см. Галактионов О. Н.

Епишков Е. Н., см. Левинский В. Н.

Есякова О. А. Растительные отходы как источник сырья для биотоплива, с. 75–84

Жукова О. П., см. Чернов В. А.

Кемпи Е. А., см. Галактионов О. Н.

Кожухов В. А., см. Рогова Е. А.

Кожухова Н. Ю., см. Чернов В. А.

Коновалова Д. А., см. Братилова Н. П.

Коростелев А. С. Репродуктивное развитие 41-летних полусибов сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica Du Tour*) от плюсовых деревьев, аттестованных по семенной продуктивности, с. 26–31

Коростелев А. С., см. Матвеева Р. Н.

Коротков А. А., см. Братилова Н. П.

Кох Ж. А., см. Есякова О. А.

Кухар И. В., см. Авдеева Е. В.

Левинский В. Н. Оценка адекватности математической модели распределения температуры в инфракрасно-вакуумной сушилке, 50–55

Мантулина А. В., см. Братилова Н. П.

Матвеева Р. Н. Изменчивость 8-летних сеянцев сосны кедровой сибирской, выращенных из отселектированных шишек алтайского происхождения, с. 20–25

Попова С. В., см. Матвеева Р. Н.

Рогова Е. А. Получение и использование бактериальной целлюлозы в качестве композитного сырья, с. 93–97

Усольцев В. А. Всеобщие модели длины кроны двухвойных сосен, с. 13–19

Ушаков А. В., см. Алашкевич Ю. Д.

Чернов В. А. Контактная ступень диабатической ректификационной колонны, с. 85–92

Щерба Ю. Е., см. Коростелев А. С.

AUTHOR'S LINK

- Alashkevich Y. D.**, see Rogova E. A.
- Alashkevich Yu. D.** Dynamics of contact of the suspension jet with an obstacle during grinding of plant polymers, p. 64–74
- Avdeeva E. V.** Evaluation of the stability of development of the assimilation apparatus of drooping birch using dendroindication methods (using the example of public gardens in Krasnoyarsk), p. 40–49
- Avdeeva E. V.**, see Avdeev A. G.
- Bratilova N. P.** Growth indicators of four-year-old planting material of *Pinus sibirica* Du Tour with closed and open root systems, p. 7–12
- Butorova O. F.**, see Matveeva R. N.
- Chernov V. A.** A contact tray for a diabatic distillation column, p. 85–92
- Dyrdin S. N.**, see Matveeva R. N.
- Elkhova M. A.**, see Galaktionov O. N.
- Epishkov E. N.**, see Levinsky V. N.
- Esyakova O. A.** Plant waste as a source of raw materials for bio fuel, p. 75–84
- Galaktionov O. N.** Changes in wood stocks during care cuts in young forests of the Prionezhsky district of the Republic of Karelia, p. 32–39
- Grishlova M. V.**, see Matveeva R. N.
- Kempi E. A.**, see Galaktionov O. N.
- Kokh Zh. A.**, see Esyakova O. A.
- Konovalova D. A.**, see Bratilova N. P.
- Korostelev A. S.** Reproductive development of 41-year-old half-stands of siberian cedar pine (*Pinus sibirica* Du Tour) from plus trees selected by seed productivity, p. 26–31
- Korostelev A. S.**, see Matveeva R. N.
- Korotkov A. A.**, see Bratilova N. P.
- Kozhuhova N. Yu.**, see Chernov V. A.
- Kozhukhov V. A.**, see Rogova E. A.
- Kukhar I. V.**, see Avdeeva E. V.
- Levinsky V. N.** Assessment of the adequacy of a mathematical model of temperature distribution in an infrared vacuum dryer, p. 50–55
- Mantulina A. V.**, see Bratilova N. P.
- Matveeva R. N.** Variability of 8-year-old siberian pine seedlings grown from selected cones of altai origin, p. 20–25
- Popova S. V.**, see Matveeva R. N.
- Rogova E. A.** Production and use of bacterial cellulose as a composite raw material, p. 93–97
- Shcherba Iu. E.**, see Korostelev A. S.
- Ushakov A. V.**, see Alashkevich Yu. D.
- Usoltsev V. A.** Generic crown length models of two-needled pines, p. 13–19
- Vasiliev A. A.**, see Galaktionov O. N.
- Voinov N. A.**, see Chernov V. A.
- Zhukova O. P.**, see Chernov V. A.
- Avdeev A. G.** Development of import-substituting equipment for precise seeding for growing seedlings with a closed root system, p. 56–63

