

Дерево

ISSN 0011-9008

1/2021 обрабатывающая
промышленность

University of Alberta
Альбертский университет
(г. Эдмонтон, Канада)



АЛЬБЕРТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (UNIVERSITY OF ALBERTA)

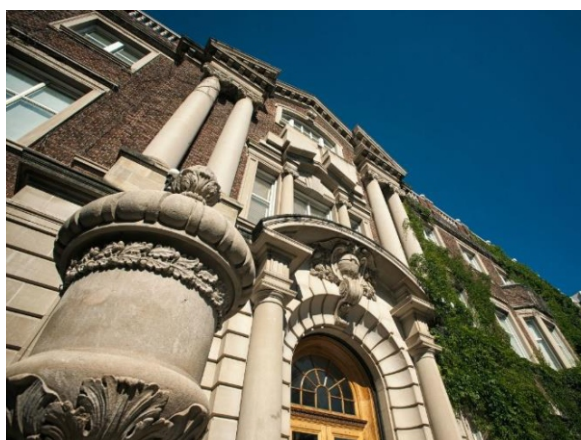
Альбертский университет является одним из самых престижных высших учебных заведений страны. Расположен в центральной части города в окружении живописных парков (Виндзор, Листер Филд, Уильям Хорелак и другие).



Основанный в 1908 году институт в настоящее время имеет 15 разных факультетов, а также два колледжа: Святого Иосифа и Святого Стефана.

Университет имеет огромную территорию с пятью кампусами, студенческими кафе, библиотекой, спортивным центром, несколькими парковками, а также больницей, где проходят практику студенты. Здесь обучаются порядка 35 000 студентов и около 1000 преподавателей, среди которых многие имеют кандидатские и профессорские степени.

Структура университета:



Университет включает в себя 15 факультетов. Самым престижным и востребованным является факультет сельского хозяйства, леса и национальной экономики, не менее важными являются факультеты искусств, бизнеса, образования, инженерный, факультет Св. Иоанна, права, библиотечного дела и информации, медицины и стоматологии, национальных меньшинств, сестринского дела, фармакологии и фармацевтики, физического воспитания и реабилитации, реабилитационной медицины, науки.

Факультет сельского хозяйства, леса и национальной экономики специализируется на природных, биологических и человеческих ресурсах. На факультете находится Девонский ботанический сад, где проводится серия испытаний на зимостойкость деревьев, кустарников, трав, однолетников и луковиц.

Дерево — обработывающая промышленность

1/2021

ISSN 0011-9008

Учредитель: Редакция журнала
«Деревообрабатывающая промышленность»
Основан в апреле 1952 г.

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по группе научных специальностей 05.21.00 – Технология, машины и оборудование лесозаготовок, лесного хозяйства, деревопереработки и химической переработки биомассы дерева.

Редакционная коллегия:



Главный редактор
Сафин Руслан Рушанович
д.т.н., профессор

ФГБОУ ВО «Казанский национальный
исследовательский технологический
университет»



Зам. главного редактора
Разумов Евгений Юрьевич
д.т.н., профессор

Czech University of Life Sciences Prague,
Faculty of Forestry and Wood Sciences,
Czech Republic

Торопов Александр Степанович, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический
университет»

Царев Евгений Михайлович, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический
университет»

Черных Михаил Михайлович, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет
им. Калашникова»



Зам. главного редактора
ответственный за
международную ред. коллегию
Štefan Barčík, Prof. ing., Ph.D.

Technical university in Zvolen,
Faculty of environmental and
manufacturing technology,
Slovakia

Сафин Рушан Гареевич, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский
технологический университет»

Баширов Владимир Николаевич, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский
технологический университет»

Гаспарян Гарик Давидович, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВПО «Братский государственный университет»

Григорьев Игорь Владиславович, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Арктический государственный
агротехнологический университет»

Мазуркин Петр Матвеевич, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический
университет»

Романов Евгений Михайлович, д.с.-х.н., профессор
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический
университет»

Рыкунин Станислав Николаевич, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВПО «Мытищинский филиал МГТУ им. Баумана»

Семенов Юрий Павлович, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВПО «Мытищинский филиал МГТУ им. Баумана»

Dr. prof. Vlado Goglia
University of Zagreb, Croatia

Dr. prof. Ruzica Beljo Lucic
University of Zagreb, Croatia

Dr. prof. Nencho Delijski
University of Forestry, Bulgaria

Dr. prof. Ladislav Dzurenda
Technical University, Slovakia

Dr. prof. Etele Csanady
University of West Hungary

Dr. prof. Alfred Teischinger
BOKU University of Natural Resources and Applied Life Sciences,
Austria

Marian Babiak, PhD, Dr.h.c.prof.RNDR.
Czech University of Life Sciences Prague,
Czech Republic

Адрес редакции:
117303, Москва, ул. Малая
Юшуньская, д. 1, корп. 1,

© «Редакция журнала
«Деревообрабатывающая
промышленность», 2021

journal_woodworking@mail.ru
www.dop1952.ru

Свидетельство о регистрации
СМИ в Роскомпечати № 014990
Формат бумаги 60x88/8
Тираж 720 экз.

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

Лесоинженерное дело

- Бурмистрова О.Н., Просужих А.А., Хитров Е.Г., Рудов С.Е., Куницкая О.А., Калита О.Н.**
Влияние переменных коэффициентов сопротивления движению и сцепления на
производительность форвардера 3
- Марков О.Б., Воронов Р.В., Давтян А.Б., Григорьев И.В., Калита Г.А.**
Математическая модель выбора системы машин для создания и эксплуатации
лесных плантаций 16
- Тамби А.А., Григорьев И.В., Давтян А.Б., Помигуев А.В., Калита О.Н., Григорьев В.И.**
Технологическая интеграция лесопромышленных предприятий 26
- Тихонов Е.А., Куницкая О.А., Швецова В.В., Калита Г.А., Фам Н.Л.**
Многокритериальная параметризация механизма двигателя Стирлинга типа «Альфа» для
адаптации к применению в лесопромышленном комплексе 37

Физико-механические процессы в деревообработке

- Шейкман Д.В.**
Применение модифицированной древесины тополя в отделке интерьера 50
- Гайнуллин Ренат Х., Сафина А.В., Цветкова Е.М., Гайнуллин Ришат Х., Губернаторов В. В.**
Экспериментальное определение средней плотности чаги 56

Химическая технология древесины

- Салимгареева Р.В., Газеев М.В., Мухаметзянов Ш.Р., Илалова Г.Ф.**
Биотехнологические методы переработки растительной биомассы 65
- Бурындин В.Г., Артёмов А.В., Савиновских А.В., Шкуро А.Е., Ершова А.С.**
Получение древесных пластиков без связующего с использованием соцветий борщевика
сосновского 75
- Сабирова Г.А., Галяветдинов Н.Р., Хайруллин Р.З., Мухаметзянов Ш.Р.**
Математическая модель прогнозирования цветовых характеристик древесно-наполненных
композитов на основе PLA 82
- Чирков Д.Д., Кудрявцев А.Д., Захаров П.С., Шкуро А.Е., Глухих В.В., Шишлов О.Ф.**
Полимерные композиционные материалы на основе полиуретана и шелухи овса 90

Лесоинженерное дело

УДК 66.15.19

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ И СЦЕПЛЕНИЯ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ФОРВАРДЕРА

О.Н. Бурмистрова, А.А. Просужих, Е.Г. Хитров, С.Е. Рудов, О.А. Куницкая, О.Н. Калита

Трелевка была и остается самой энергоемкой и экологически вредной операцией лесосечных работ. Кроме того, именно производительность трелевки, в подавляющем большинстве случаев, является лимитирующей для производительности комплекса лесозаготовительных машин в целом. Помимо среднего расстояния трелевки, которое зависит от размеров и конфигурации лесосеки, схемы размещения трелевочных волоков, а также базовой грузоподъемности трелевочной техники, на ее производительность сильно влияют почвенно-грунтовые и рельефные условия. Эти условия лимитируют проходимость, значит и корректируют возможный объем перемещаемой пачки лесоматериалов. Силы сопротивления движению трелевочного трактора и сцепления зависят не только от свойств грунта и движителя, но и от показателей воздействия движителя на грунт. При увеличении удельного давления движителя на опорную поверхность происходит сжатие грунта, развивается его осадка; за счет касательной нагрузки при движении машины развиваются сдвиговые деформации, вплоть до среза и фрезерования грунта. На практике эти явления учитываются редко, что приводит к снижению точности расчета. Но это необходимо учитывать при определении плановой производительности на трелевке, и, соответственно, всего комплекса лесозаготовительных машин. В статье выполнен анализ производительности операции трелевки лесоматериалов, выявлены взаимосвязи тягово-сцепных свойств и давления движителей лесных машин на грунт. На основе результатов выполненных расчетов получены зависимости коэффициентов сопротивления движению и сцепления от давления движителя на опорную поверхность и ее механических свойств, характеризующихся несущей способностью, для трех типов движителей: колесных, колесно-гусеничных и гусеничных. С учетом этого, представлены уточненные зависимости для расчета допустимого веса пачки трелеваемых лесоматериалов с учетом зависимостей сопротивления движению и сцепления с грунтом от удельного давления по пятну контакта движителя с опорной поверхностью. Зависимости получены на основе решения уравнения равномерного движения трелевочной системы по наклонному волоку, в котором коэффициенты сопротивления и сцепления выражены как линейные функции соотношения давления движителя и несущей способности грунта.

Ключевые слова: лесные почвогрунты, производительность, лесозаготовки, форвардер, сопротивление движению.

Введение

Одним из основных факторов, влияющих на производительность трелевки древесины, является объем пачки трелеваемых лесоматериалов [1, 2]. Объем древесины определяется расчетным весом пачки, а также долей веса, приходящегося на кору и крону. При этом допустимый вес пачки лесоматериалов ограничен грузоподъемностью техники, силой тяги по сцеплению, сцеплением движителя с опорной поверхностью и, в теплый период года, глубиной образующейся колеи [3, 4]. Грузоподъемность является паспортной характеристикой машины и принимается как входной параметр при расчете. Ограничение по глубине колеи, в том числе, учитывается при необходимости обеспечить экологическую безопасность трелевки. Весьма заметную роль в производительности форвардера играет схема расположения трелевочных волоков, от оптимальности выбора которой зависит и среднее расстояние трелевки, и проходимость машин [5]. Для расчета веса пачки, ограниченного силой тяги и сцеплением, решается уравнение равномерного движения трелевочной системы, в котором сопротивление движению и сцепление определяются с использованием безразмерных коэффициентов, зависящих от состояния опорной поверхности и типа движителя машины [6].

В практических расчетах для оценки тягово-сцепных свойств движителей лесных машин используют коэффициенты сопротивления движению и сцепления с грунтом [5, 6]. Коэффициенты, как правило,

считаются постоянными величинами, зависящими от начальных свойств опорной поверхности и типа движителя [7, 8]. Вместе с тем, физическая картина взаимодействия движителей машин с грунтами предполагает изменение состояния опорной поверхности, срез, осадку и уплотнение [9-11]. Развитие осадки грунта по мере увеличения давления на грунт носит нелинейный характер, таким образом, объем деформируемого грунта увеличивается непропорционально давлению [12, 13], следовательно, коэффициент сопротивления движению не является постоянной величиной. Возможный срез грунта приводит к снижению сопротивления сдвиговой деформации [14], следовательно, коэффициент сцепления также не является постоянной величиной.

Выявление взаимосвязи тягово-сцепных свойств и давления движителя на грунт, получение зависимости коэффициентов сопротивления движению и сцепления от давления движителя на опорную поверхность и ее механических свойств, а также уточнение зависимости для расчета допустимого веса пачки лесоматериалов с учетом зависимостей сопротивления движению и сцепления с грунтом от удельного давления по пятну контакта движителя с опорной поверхностью является актуальной теоретической и практической задачей для лесозаготовительного производства.

Результаты исследования

Часовая производительность форвардера зависит от рейсовой нагрузки и затрат времени на цикл трелевки, а также от качества подготовки и адекватности работы оператора [17, 20]. Рейсовая нагрузка форвардера ограничена несколькими факторами, связанными с весом трелеваемых лесоматериалов. К ним относятся: ограничение по тяговому усилию форвардера; ограничение по сцеплению движителя форвардера с грунтом; ограничение по грузоподъемности форвардера. Рассмотрим уравнения для определения допустимого веса трелеваемых лесоматериалов.

Форвардер трелеует лесоматериалы в полностью погруженном состоянии. В этом случае уравнение равномерного движения машины имеет вид:

$$F_k = (P + Q)(\varphi_{mp} \cos \beta + \sin \beta), \quad (1)$$

где F_k – касательная сила тяги, ограниченная максимальным тяговым усилием либо сцеплением движителя форвардера с грунтом, P – вес форвардера, Q – вес трелеваемых лесоматериалов, φ_{mp} – коэффициент сопротивления движению машины, β – угол наклона трелевочного волока.

Ограничение по максимальному тяговому усилию имеет вид:

$$F_k \leq F_m, \quad (2)$$

где F_m – максимальное тяговое усилие (зависит от модели форвардера).

Ограничение по сцеплению движителя с грунтом имеет вид:

$$F_k \leq (P + Q)\mu, \quad (3)$$

где μ – коэффициент сцепления движителя с грунтом.

Коэффициент сопротивления движению и коэффициент сцепления зависят от состояния грунта и давления на него со стороны движителя. При линейных зависимостях запишем:

$$\varphi_{mp} = a_{\varphi mp} + b_{\varphi mp} \frac{P}{p_s}, \quad (4)$$

$$\mu = a_{\mu} + b_{\mu} \frac{P}{p_s}, \quad (5)$$

где $a_{\varphi mp}$, $b_{\varphi mp}$, a_{μ} , b_{μ} – числовые коэффициенты, зависящие от типа движителя (табл. 1), p – давление движителя на грунт, p_s – несущая способность грунта (табл. 2).

Давление движителя на почвогрунт находится по формуле:

$$p = \frac{P + Q}{A}, \quad (6)$$

где A – суммарная площадь контакта движителя с грунтом.

Таблица 1 – Числовые коэффициенты линейных функций коэффициентов сопротивления движению и сцепления с грунтом

Коэффициент	Тип движителя		
	колесный	колесно-гусеничный	гусеничный
$a_{\varphi R}$	-0,0694	0,0166	0,0359
$b_{\varphi R}$	0,4195	0,1503	0,0685
a_{μ}	0,4289	0,4845	0,4964
b_{μ}	-0,2206	-0,2967	-0,3126

Таблица 2 – Несущая способность лесных грунтов

Характеристика грунта	Категория грунта	Несущая способность p_s , МПа
Влажный, слабонесущий	III	0,04
Средней прочности	II	0,1
Сухой прочный	I	0,3

Для колесных машин площадь определяется по формуле:

$$A = nBd, \quad (7)$$

где n – число осей форвардера, B – ширина колеса, d – диаметр колеса.

Для колесно-гусеничных машин площадь найдем по формуле:

$$A = nB \cdot (1,25d + 0,4), \quad (8)$$

где n – число колесно-гусеничных пар.

На основе формул (1), (2), (4), (6) получим уравнение для определения веса трельюемых лесоматериалов, ограниченного максимальным тяговым усилием форвардера:

$$X_1 Q^2 + X_2 Q + X_3 = 0, \quad (9)$$

где X_1, X_2, X_3 – вспомогательные обозначения:

$$X_1 = \frac{b_{\varphi mp}}{p_s A} \cos \beta, \quad (10)$$

$$X_2 = \left(a_{\varphi mp} + \frac{2b_{\varphi mp} P}{p_s A} \right) \cos \beta + \sin \beta, \quad (11)$$

$$X_3 = \left(a_{\varphi mp} + \frac{b_{\varphi mp} P}{p_s A} \right) \cos \beta + P \sin \beta - F_m. \quad (12)$$

Решение уравнения (9) имеет вид:

$$Q = \frac{X_2 + \sqrt{4X_1 X_3 + X_2^2}}{2X_1}. \quad (13)$$

На основе формул (1), (3), (6) получим уравнение для расчета веса лесоматериалов, ограниченного сцеплением форвардера с грунтом:

$$Z_1 Q^2 + Z_2 Q + Z_3 = 0, \quad (14)$$

где Z_1, Z_2, Z_3 – вспомогательные обозначения:

$$Z_1 = \frac{b_{\varphi mp}}{p_s A} \cos \beta - \frac{b_{\mu}}{p_s A}, \quad (15)$$

$$Z_2 = \left(a_{\varphi mp} + \frac{2b_{\varphi mp} P}{p_s A} \right) \cos \beta + \sin \beta - a_{\mu} - \frac{2b_{\mu} P}{p_s A}, \quad (16)$$

$$Z_3 = \left(a_{\varphi mp} + \frac{b_{\varphi mp} P}{p_s A} \right) \cos \beta + P \sin \beta - \left(a_{\mu} + \frac{b_{\mu} P}{p_s A} \right) P. \quad (17)$$

Решение уравнения (14) имеет вид:

$$Q = \frac{-Z_2 + \sqrt{-4Z_1 Z_3 + Z_2^2}}{2Z_1}. \quad (18)$$

Кроме того, вес лесоматериалов, трелюемых форвардером, ограничен грузоподъемностью, зависящей от модели форвардера:

$$Q \leq L, \quad (19)$$

где L – грузоподъемность форвардера.

В качестве расчетной рейсовой нагрузки принимается меньшее значение Q , рассчитанное по формулам (13), (18), (19).

Объем трелюемых лесоматериалов найдем по формуле:

$$V_{\Pi} = \frac{Q}{\gamma}, \quad (20)$$

где γ – объемный вес древесины (зависит от ее породы и состояния).

Скорость груженого форвардера определим по формуле:

$$v_{zx} = \min \left\{ \frac{N_{\partial \partial} \eta}{(P + Q) \left(\left(a_{\varphi mp} + b_{\varphi mp} \frac{P}{p_s} \right) \cos \beta + \sin \beta \right)}; v_{\max} \right\}, \quad (21)$$

где $N_{\partial \partial}$ – мощность двигателя форвардера, η – КПД трансмиссии, где $v_{\max}$ – скорость форвардера, ограниченная технологическими соображениями.

Скорость форвардера при движении в холостом направлении найдем по формуле:

$$v_{xx} = \min \left\{ \frac{N_{\partial \partial} \eta}{P \cdot \left(\left(a_{\varphi mp} + b_{\varphi mp} \frac{P_0}{p_s} \right) \cos \beta + \sin \beta \right)}; v_{\max} \right\}, \quad (22)$$

где P_0 – давление порожнего форвардера на грунт:

$$P_0 = \frac{P}{A}. \quad (23)$$

Скорость форвардера при наборе пачки лесоматериалов определим как среднее значение:

$$v_{\Pi\Pi} = \frac{v_{zx} + v_{xx}}{2}. \quad (24)$$

Сменная производительность форвардера определяется по формуле:

$$\Pi_{cm} = (T_{cm} - t_p) \cdot \Pi_q, \quad (25)$$

где Π_q – часовая производительность форвардера, $T_{см}$ – продолжительность смены, t_p – время регламентированных простоев.

Часовая производительность форвардера находится по формуле:

$$\Pi_q = 3600 \frac{V_{\Pi}}{T_{\Pi}}, \quad (26)$$

где V_{Π} – рейсовая нагрузка, T_{Π} – время цикла трелевки.

Время цикла трелевки определяется как сумма:

$$T_{\Pi} = t_{нов} n_c + t_{ногр} \frac{V_{\Pi}}{V_3} + t_{ин} + t_{ex} + t_{xx} + t_{разгр} \frac{V_{\Pi}}{V_{3,разгр}}, \quad (27)$$

где $t_{нов}$ – время перевода манипулятора в транспортное положение, $t_{ногр}$ – времена работы манипулятора при загрузке одной порции лесоматериалов в кузов, $t_{ин}$ – время движения форвардера при наборе пачки, t_{ex} – время движения форвардера в грузовом направлении, t_{xx} – время движения форвардера при движении в холостом направлении, $t_{разгр}$ – времена выгрузки одной порции лесоматериалов из кузова форвардера, n_c – число стоянок форвардера при загрузке кузова, V_3 – объем лесоматериалов, захватываемых манипулятором при загрузке кузова, $V_{3,разгр}$ – объем лесоматериалов, захватываемых манипулятором при разгрузке кузова.

Число стоянок форвардера при загрузке кузова с округлением до целого числа найдем по формуле:

$$n_c = \frac{V_{\Pi}}{Q_c}, \quad (28)$$

где Q_c – объем сортиментов, набираемых с одной стоянки:

$$Q_c = \frac{2Bl_m q}{10000}, \quad (29)$$

где B – ширина ленты набора пачки, l_m – максимальный вылет манипулятора, q – объем выборки леса на 1 га (при сплошной рубке равен запасу древесины на 1 га).

При разработке лесосеки на базе харвестера и форвардера ширина ленты набора пачки равна:

$$B = 2l_m. \quad (30)$$

Объем лесоматериалов, захватываемых манипулятором при загрузке кузова, приближенно равен среднему объему хлыста:

$$V_3 = V_x. \quad (31)$$

Объем лесоматериалов, захватываемых манипулятором при разгрузке кузова, определяется по формуле:

$$V_{3,разгр} = l_{сорт} S_3 k, \quad (32)$$

где $l_{сорт}$ – длина сортимента, S_3 – площадь раскрытия захвата манипулятора, k – коэффициент полндревесности.

Время движения форвардера при наборе пачки определяется по формуле:

$$t_{ин} = \frac{l_{ин}}{v_{ин}}, \quad (33)$$

где $l_{ин}$ – длина ленты набора пачки:

$$l_{ин} = \frac{10000 V_{\Pi}}{Bq}. \quad (34)$$

Время грузового и холостого хода форвардера найдем соответственно по формулам:

$$t_{ex} = \frac{l_{среди} + l_{ин}}{v_{ex}}, \quad (35)$$

$$t_{xx} = \frac{l_{ср\text{едн}}}{v_{xx}}, \quad (36)$$

Коэффициент сопротивления движению трелевочного трактора является частным силы сопротивления и нагрузки со стороны движителя [6, 7]:

$$\varphi_R = \frac{F_R}{pbl}, \quad (37)$$

где F_R – сила сопротивления движению, p – нормальное давление со стороны движителя, b – ширина пятна контакта, l – длина пятна контакта.

Сила сопротивления грунта определяется интегрированием зависимости давления p от глубины колеи h :

$$F_R = b \int_0^h p dh. \quad (38)$$

Уравнение осадки опорной поверхности (глубины колеи), учитывающее сжатие и сдвиг слоев почвогрунта при вдавливании движителя, а также реологические свойства почвогрунта, имеет вид:

$$h = \frac{Jpabp_sK}{\sqrt{(p_s-p)(p_s-(JKp_s+1)p)}} \arctg \frac{(p_s-p)(H-h)}{ab\sqrt{(p_s-p)(p_s-(JKp_s+1)p)}}, \quad (39)$$

где p – нормальное давление движителя на почвогрунт, p_s – несущая способность опорной поверхности, H – толщина деформируемого слоя, K – жесткость опорной поверхности, J, a – вспомогательные параметры, учитывающие соотношение сторон пятна контакта:

$$J = \frac{0,03b + l}{0,6b + 0,43l}, \quad a = 0,64 \frac{b + H}{H}, \quad (40)$$

Жесткость K определяется реологической моделью опорной поверхности. Получили распространение несколько реологических моделей грунта (модель Гука, Максвелла, Кельвина-Фойгта, Максвелла-Томпсона (Гогенемзера-Прагера), Пойнтинга-Томпсона, Летерзиха, Бюргерса, Бингама-Шведова, Бингама, Шведова). Иллюстрации результатов расчетов выполнены для модели Максвелла-Томпсона:

$$K = \frac{E + E_d}{EE_d} - \frac{1}{E_d} \exp\left(-\frac{E_d}{\eta} t\right), \quad (41)$$

где E – модуль деформации, E_d – модуль длительной деформации, η – вязкость грунта, t – время воздействия движителя:

$$t = n \frac{l}{v}, \quad (42)$$

где n – число последовательных проходов движителя по колее, v – поступательная скорость машины.

Несущая способность опорной поверхности определяется по формулам В.В. Ларина [16]:

$$\left\{ \begin{array}{l} p_s = p_{s0} \alpha_z \\ p_{s0} = 0,5K_1 N_1 \gamma b + N_2 \gamma h + K_3 N_3 C \\ K_1 = \frac{l}{l+0,4b}; K_3 = \frac{l+b}{l+0,5b} \\ N_1 = \frac{1-S_\phi^4}{S_\phi^5}; N_2 = \frac{1}{S_\phi^2}; N_3 = \frac{2(1+S_\phi^2)}{S_\phi^3}; S_\phi = \tg\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) \\ \alpha_z = 1 + \frac{h \frac{\sqrt{2}}{2} \exp\left[\left(\frac{\pi}{4} + \frac{3\phi}{4}\right) \tg \frac{3\phi}{4}\right] b \cos \frac{3\phi}{4} \tg \phi}{2H \cdot \left(H-h-0,25 \frac{\sqrt{2}}{2} \exp\left[\left(\frac{\pi}{4} + \frac{3\phi}{4}\right) \tg \frac{3\phi}{4}\right] b \cos \frac{3\phi}{4} \tg \phi\right)} \end{array} \right. \quad (43)$$

где C – удельное сцепление почвогрунта, ϕ – угол внутреннего трения, γ – удельный вес почвогрунта.

Коэффициент сцепления является частным максимального сопротивления почвогрунта сдвигу и нормальной нагрузки на грунт [16]:

$$\mu = \frac{\tau_t}{p} \quad (44)$$

где τ_t – среднее значение касательного напряжения, распределенного по длине контакта.

Среднее значение касательного напряжения, распределенного по длине контакта, найдем по формуле [16]:

$$\tau_t = \frac{1}{l} \cdot \left\{ \frac{G^2(Cj_0 + \tau_{m0}t_{gr})^2}{St_{gr}(C-G)^3} \ln \frac{SGl + \tau_{m0}t_{gr}}{Gj_0 + \tau_{m0}t_{gr}} \frac{(lS - j_0)C}{G} + \frac{\tau_{m0}^2 t_{gr}}{SG} \ln \frac{SGl + \tau_{m0}t_{gr}}{Gj_0 + \tau_{m0}t_{gr}} + \right. \\ \left. + \frac{(G^2(-lS + j_0) + ((lS + j_0)C + 4\tau_{m0}t_{gr})G - 2\tau_{m0}t_{gr}C)(lS - j_0)C}{2St_{gr}(C-G)^2} \right\} * \\ * Heaviside\left(l - \frac{j_0}{S}\right) - \frac{\tau_{m0}^2 t_{gr}}{GSl} \ln \frac{SGl + \tau_{m0}t_{gr}}{\tau_{m0}t_{gr}} + \tau_{m0}, \quad (45)$$

где G – модуль сдвига почвогрунта, t_{gr} – шаг грунтозацепов, S – коэффициент буксования, $Heaviside(\dots)$ – единичная функция Хевисайда:

$$\begin{cases} Heaviside(\xi) = 1, \xi \geq 0, \\ Heaviside(\xi) = 0, \xi < 0 \end{cases} \quad (46)$$

j_0 – деформация сдвига, при которой возникает срез опорной поверхности [7]:

$$j_0 = \frac{\tau_{m0}t_{gr}}{G} \left(\sqrt{\frac{G}{C}} - 1 \right), \quad (47)$$

где τ_{m0} – максимальное сопротивление сдвигу без учета возможного среза опорной поверхности [8]:

$$\tau_{m0} = p \operatorname{tg} \varphi + C. \quad (48)$$

Выполним расчеты для трех категорий прочности лесного почвогрунта, физико-механические свойства которого указаны в таблице 3.

Таблица 3 – Физико-механические свойства лесного грунта по категориям прочности

Параметр	Разм.	III (слабонесущий)	II (средней прочности)	I (прочный)
E	МПа	0,4	1	3
E_0	МПа	0,4	1	3
G	МПа	2,192	2,44	2,77
η	МПа·с	1,343	7,8	64,29
C	МПа	0,005	0,012	0,024
φ	°	11	15	16
γ	МН/м ³	0,0075	0,0085	0,0095
H	м	0,8	0,4	0,3

Расчеты выполнены для трех типов движителя лесных машин (колесного, колесно-гусеничного и гусеничного) с характеристиками, указанными в таблице 4.

Таблица 4 – Характеристики движителей лесных машин

Параметр	Разм.	колесный	колесно-гусеничный	гусеничный
b	м	0,7	0,7	0,6
l	м	0,667	2,366	6
$p_{\max}$	МПа	0,14	0,08	0,07

При заданных характеристиках лесного почвогрунта и параметрах пятна контакта проводили расчет при варьировании давления p в пределах от 0 до $p_{\max}$ с шагом $1/100p_{\max}$. Для каждого значения давления p определяли h как численное решение уравнения (39), коэффициент сопротивления движению по формуле (37) находили по результатам интегрирования методом трапеций зависимости (38). Для каждого значения p численно определяли максимум функции (45) в зависимости от коэффициента буксования S .

Обработка полученных расчетных данных показала, что коэффициенты сопротивления движению и сцепления с точностью, достаточной для практических расчетов, описываются линейными функциями соотношения давления движителя и несущей способности лесного грунта:

$$\varphi_R = a_{\varphi R} + b_{\varphi R} \frac{p}{p_s}, \quad (49)$$

$$\mu_{\max} = a_{\mu} + b_{\mu} \frac{p}{p_s}, \quad (50)$$

значения параметров a, b приведены в таблице 5.

Результаты расчетов представлены на рисунках 1-3.

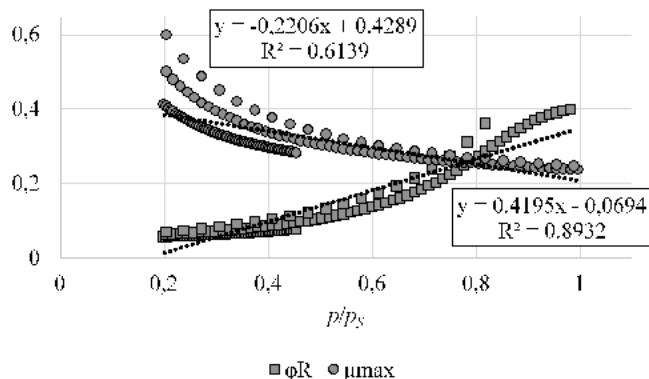


Рис. 1. Коэффициент сопротивления движению и максимальный коэффициент сцепления колесного движителя с лесным грунтом

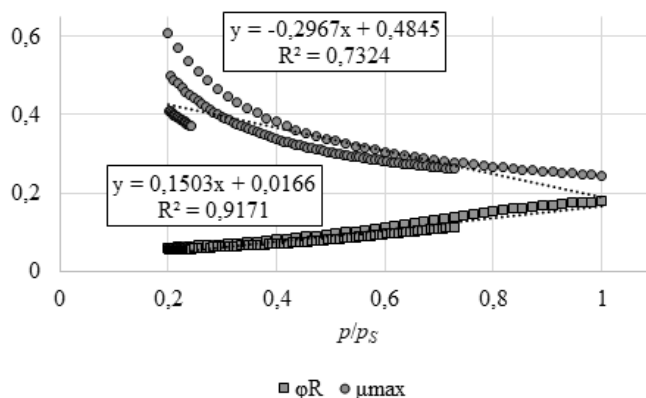


Рис. 2. Коэффициент сопротивления движению и максимальный коэффициент сцепления колесно-гусеничного движителя с лесным грунтом

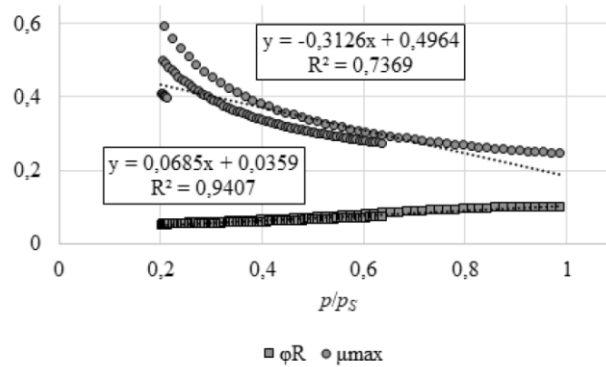


Рис. 3. Коэффициент сопротивления движению и максимальный коэффициент сцепления гусеничного движителя с лесным грунтом

Таблица 5 – Параметры линейных функций коэффициентов сопротивления движению и сцепления

Параметр	колесный	колесно-гусеничный	гусеничный
$a_{\phi R}$	-0,0694	0,0166	0,0359
$b_{\phi R}$	0,4195	0,1503	0,0685
a_{μ}	0,4289	0,4845	0,4964
b_{μ}	-0,2206	-0,2967	-0,3126

Уравнение равномерного движения трелевочной системы имеет вид [5, 19]:

$$F_k = (P + KQ)\phi_{R,тр} \cos \beta + (1 - K)Q\phi_{R,п} \cos \beta + (P + KQ) \sin \beta + (1 - K)Q \sin \beta, \quad (51)$$

где F_k – касательная сила тяги, P – вес лесной машины, Q – вес трелеваемых лесоматериалов, K – доля веса пачки лесоматериалов, приходящаяся на машины, β – угол наклона трелевочного волока, $\phi_{R,mp}$ – коэффициент сопротивления движению машины, $\phi_{R,n}$ – коэффициент сопротивления волочению пачки лесоматериалов.

Равномерное поступательное движение обеспечивается при соблюдении условий (2) и (3).

Максимальное тяговое усилие является характеристикой машины (входной параметр), сила сцепления определяется по формуле:

$$F_{сч} = (P + KQ)\mu, \quad (52)$$

где μ – коэффициент сцепления движителя с грунтом.

Ориентируясь на [18], примем, что коэффициенты сопротивления и сцепления зависят от соотношения удельного давления на грунт и его несущей способности:

$$\phi_{R,тр} = a_{\phi R,тр} + b_{\phi R,тр} \frac{p}{p_S}, \quad (53)$$

$$\phi_{R,п} = a_{\phi R,п} + c_{\phi R,п} \frac{(1-K)Q}{p_S}, \quad (54)$$

$$\mu = a_{\mu} + b_{\mu} \frac{p}{p_S}, \quad (55)$$

где p – удельное давление на грунт, p_S – несущая способность грунта, $a_{\phi R,mp}$, $b_{\phi R,mp}$, $a_{\phi R,n}$, $c_{\phi R,n}$ [м²], a_{μ} , b_{μ} – числовые коэффициенты.

Удельное давление определяется по формуле:

$$p = \frac{P + KQ}{A}, \quad (56)$$

где A – общая площадь пятна контакта с грунтом.

Максимальный вес трелеваемой пачки лесоматериалов, ограниченный условием (2), определим по формуле (13), с учетом выражений (10-12):

При этом, для горизонтального волока формулы (10-12) упрощаются:

$$X_1 = \frac{K^2 b_{\phi R,тр} + (K-1)^2 c_{\phi R,п} A}{p_S A}, \quad (57)$$

$$X_2 = \frac{((K(a_{\phi R, \text{тр}} - a_{\phi R, \text{п}}) + a_{\phi R, \text{п}})p_S A + 2KPb_{\phi R, \text{тр}})}{p_S A}, \quad (58)$$

$$X_3 = \frac{a_{\phi R, \text{тр}}p_S A + b_{\phi R, \text{тр}}P}{p_S A} P - F_T. \quad (59)$$

При трелевке форвардером в полностью погруженном состоянии получим:

$$X_1 = \frac{b_{\phi R, \text{тр}}}{p_S A} \cos \beta, \quad (60)$$

$$X_2 = \frac{(a_{\phi R, \text{тр}}p_S A + 2Pb_{\phi R, \text{тр}}) \cos \beta + p_S A \sin \beta}{p_S A}, \quad (61)$$

$$X_3 = \frac{a_{\phi R, \text{тр}}p_S A + b_{\phi R, \text{тр}}P}{p_S A} P \cos \beta + P \sin \beta - F_T. \quad (62)$$

В случаях, когда трелевка форвардером происходит по горизонтальному волоку в полностью погруженном состоянии, получим:

$$X_1 = \frac{b_{\phi R, \text{тр}}}{p_S A}, \quad (63)$$

$$X_2 = \frac{a_{\phi R, \text{тр}}p_S A + 2Pb_{\phi R, \text{тр}}}{p_S A}, \quad (64)$$

$$X_3 = \frac{a_{\phi R, \text{тр}}p_S A + b_{\phi R, \text{тр}}P}{p_S A} P - F_T. \quad (65)$$

При этом выражения (15-17) для определения Z_1, Z_2, Z_3 – вспомогательных обозначений уравнения (18) будут выглядеть следующим образом:

$$Z_1 = \frac{(K^2(b_{\phi R, \text{тр}} + c_{\phi R, \text{п}}A) - 2Kc_{\phi R, \text{п}}A + c_{\phi R, \text{п}}A) \cos \beta - K^2b_{\mu}}{p_S A}, \quad (66)$$

$$Z_2 = \frac{((K(a_{\phi R, \text{тр}} - a_{\phi R, \text{п}}) + a_{\phi R, \text{п}})p_S A + 2KPb_{\phi R, \text{тр}}) \cos \beta - Ka_{\mu}p_S A - 2KPb_{\mu} + p_S A \sin \beta}{p_S A} \quad (67)$$

$$Z_3 = \frac{a_{\phi R, \text{тр}}p_S A + b_{\phi R, \text{тр}}P}{p_S A} P \cos \beta - \left(\frac{a_{\mu}p_S A + b_{\mu}P}{p_S A} \right) P + P \sin \beta \quad (68)$$

А при трелевке по горизонтальному волоку получим:

$$Z_1 = \frac{(K^2(b_{\phi R, \text{тр}} + c_{\phi R, \text{п}}A) - 2Kc_{\phi R, \text{п}}A + c_{\phi R, \text{п}}A) - K^2b_{\mu}}{p_S A}, \quad (69)$$

$$Z_2 = \frac{((K(a_{\phi R, \text{тр}} - a_{\phi R, \text{п}}) + a_{\phi R, \text{п}})p_S A + 2KPb_{\phi R, \text{тр}}) - Ka_{\mu}p_S A - 2KPb_{\mu}}{p_S A}, \quad (70)$$

$$Z_3 = \frac{a_{\phi R, \text{тр}}p_S A + b_{\phi R, \text{тр}}P}{p_S A} P - \left(\frac{a_{\mu}p_S A + b_{\mu}P}{p_S A} \right) P. \quad (71)$$

При трелевке в полностью погруженном состоянии получим:

$$Z_1 = \frac{b_{\phi R, \text{тр}} \cos \beta - b_{\mu}}{p_S A}, \quad (72)$$

$$Z_2 = \frac{(a_{\phi R, \text{тр}}p_S A + 2Pb_{\phi R, \text{тр}}) \cos \beta - a_{\mu}p_S A - 2Pb_{\mu} + p_S A \sin \beta}{p_S A}, \quad (73)$$

$$Z_3 = \frac{a_{\phi R, \text{тр}}p_S A + b_{\phi R, \text{тр}}P}{p_S A} P \cos \beta - \left(\frac{a_{\mu}p_S A + b_{\mu}P}{p_S A} \right) P + P \sin \beta. \quad (74)$$

При трелевке форвардером по волоку без наклона и в полностью погруженном состоянии получим:

$$Z_1 = \frac{b_{\phi R, \text{тр}} - b_{\mu}}{p_S A}, \quad (75)$$

$$Z_2 = \frac{a_{\phi R, \text{тр}}p_S A - a_{\mu}p_S A + 2Pb_{\phi R, \text{тр}} - 2Pb_{\mu}}{p_S A}, \quad (76)$$

$$Z_3 = \frac{a_{\phi R, \text{тр}}p_S A - a_{\mu}p_S A + b_{\phi R, \text{тр}}P - b_{\mu}P}{p_S A} P. \quad (77)$$

Выводы

Уточнены зависимости для расчета допустимого веса пачки лесоматериалов с учетом зависимостей сопротивления движению и сцепления с грунтом от удельного давления по пятну контакта движителя с опорной поверхностью. Выявлены взаимосвязи тягово-сцепных свойств и давления движителя на грунт, получить зависимости коэффициентов сопротивления движению и сцепления от давления движителя на опорную поверхность и ее механических свойств. Полученные уравнения позволяют на практике рассчитать допустимый вес пачки лесоматериалов с учетом зависимостей сопротивления движению и сцепления с грунтом от удельного давления по пятну контакта движителя с опорной поверхностью.

Литература

1. Григорьев И.В. Параметры и показатели работы перспективного форвардера для малообъемных лесозаготовок // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2018. Т. 6. № 4 (40). С. 21-25.
2. Григорьев И.В., Чураков А.А. Совершенствование конструкции активного полуприцепа форвардера на базе сельскохозяйственного колесного трактора // Транспортные и транспортно-технологические системы. Материалы Международной научно-технической конференции. Отв. ред. Н. С. Захаров. 2018. С. 84-88.
3. Григорьев И.В. Особенности эксплуатации лесных машин в сильные морозы // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности. Материалы международной научно-технической конференции молодых ученых. Главный редактор И.С. Сазонов. 2018. С. 102.
4. Григорьев И.В. Сервисные контракты для современных лесных машин // Повышение эффективности лесного комплекса. Материалы Пятой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием. 2019. С. 26-28.
5. Григорьев И.В., Жукова А.И. Координатно-объемная методика трассирования при освоении лесосек трелевкой // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2004. № 4. С. 39-44.
6. Дмитриева М.Н., Григорьев И.В., Лухминский В.А., Казаков Д.П., Хахина А.М. Экспериментальные исследования конусного индекса и физико-механических свойств заболоченного грунта // Лесотехнический журнал. 2017. Т. 7. № 4 (28). С. 167-174.
7. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Жукова А.И., Иванов В.А. Исследование механических процессов циклического уплотнения почвогрунта при динамических нагрузках // Вестник КрасГАУ. 2008. № 1. С. 163-175.
8. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Жукова А.И. Оценка процессов деформирования почвы при циклическом уплотнении // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2008. № 4. С. 7.
9. Шапиро В.Я., Григорьева О.И., Григорьев И.В., Григорьев М.Ф. Теоретическое исследование процесса разрушения массива грунта сферическими ножами при использовании комбинированных конструкций грунтометов для тушения лесных пожаров // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2018. № 1 (361). С. 61-69.
10. Добрецов Р.Ю., Григорьев И.В. Перспективные трансмиссии лесных гусеничных машин // Повышение эффективности лесного комплекса. Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2018. С. 57-58.
11. Zhuk A.Yu., Nahina A.M., Grigorev I.V., Ivanov V.A., Gasparyan G.D., Manukovsky A.Y., Kunitskaya O.A., Danilenko O.K., Grigoreva O.I. [Modelling of indenter pressed into heterogeneous soil] // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2018. – Т. 13. – № S8. – С. 6419-6430.
12. Rudov S.E., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Druzyanova V.P., Pekhutov A.S., Ivanov A.P., Ivanov A.K., Okhlopko M.K., Pankov V.Yu., Borovikov R.G. [Specific features of accounting of state of the massive of the frozen soil grounds under cyclic loads] // Bulgarian Journal of Agricultural Science. – 2019. – Т. 25. – № S2. – С. 191-205.
13. Дмитриева М.Н., Григорьев И.В., Рудов С.Е. Анализ исследований взаимодействия колёсного движителя лесных машин со слабонесущим почвогрунтом // Resources and Technology. 2019. Т. 1. № 16. С. 10-39.
14. Grigorev M.F., Grigoreva A.I., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Stepanova D.I., Savvinova M.S., Sidorov M.N., Tomashevskaya E.P., Burtseva I.A., Zakharova O.I. [Experimental findings in forest soil mechanics] // EurAsian Journal of BioSciences. – 2018. – Т. 12. – № 2. – С. 277-287.
15. Божбов В.Е., Григорьев И.В., Рудов С.Е., Тетеревлева Е.В., Чемшикова Ю.М. Анализ подходов к описанию процессов взаимодействия движителей лесных машин с почвогрунтами лесосек // Resources and Technology. 2019. Т. 16. № 2. С. 13-35.
16. Ларин В.В. Методы прогнозирования опорной проходимости многоосных колесных машин на местности: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03 - М.: 2007. - 530 с.
17. Григорьев И.В., Войнаш С.А. Повышение эффективности подготовки операторов лесных машин // Лесозаготовка и комплексное использование древесины. Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск, 2020. С. 62-66.
18. Агейкин Я.С. Проходимость автомобилей - М.: Машиностроение, 1981. - 232 с.

19. Григорьев И.В., Чураков А.А., Григорьева О.И. Перспективная конструкция гусеничного форвардера // Транспортные и транспортно-технологические системы. материалы международной научно-технической конференции. 2017. С. 140-144.

20. Григорьев И.В., Григорьева О.И. Практика подготовки операторов лесных машин в России // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Ответственные редакторы Ю.А. Безруких, Е.В. Мельникова. 2017. С. 182-185.

© **Бурмистрова О.Н.** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и машин лесозаготовок и инженерной геодезии, ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», (ФГБОУ ВО «УГТУ»), e-mail: olga.burm@mail.ru; **Просужих А. А.** – старший преподаватель кафедры технологии и машин лесозаготовок и инженерной геодезии, ФГБОУ ВО «УГТУ», e-mail: chemshikova79@mail.ru; **Хитров Е.Г.** – канд. техн. наук, доцент Высшей школы интеллектуальных систем и суперкомпьютерных технологий, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГБОУ ВО «СПбПУ им. Петра Великого»), e-mail: yegorkhitrov@gmail.com; **Рудов С.Е.** – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры № 3, ФГКВБОУ ВО «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного», e-mail: 89213093250@mail.ru; **Куницкая О.А.** – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии и оборудования лесного комплекса, ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет» (ФГБОУ ВО «АГАТУ»), e-mail: ola.ola07@mail.ru; **Калита О.Н.** – старший преподаватель кафедры технологии лесопользования и ландшафтного строительства, ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ТГУ»), e-mail: o.n.kalita@mail.ru.

UDC 66.15.19

INFLUENCE OF VARIABLE COEFFICIENTS OF RESISTANCE TO MOVEMENT AND COUPLING ON THE PERFORMANCE OF THE FORWARDER

O.N. Burmistrova, A.A. Prosuzhih, E.G. Hitrov, S.E. Rudov, O.A. Kunitskaya, O.N. Kalita

Skidding was and remains the most energy-intensive and environmentally harmful operation of logging operations. In addition, it is the performance of skidding, in the vast majority of cases, that is limiting for the productivity of the complex of logging machines as a whole. In addition to the average skidding distance, which depends on the size and configuration of the cutting area, the layout of skidding hauls, as well as the basic load capacity of skidding equipment, its performance is strongly affected by soil and terrain conditions. These conditions limit the passability, which means that they adjust the possible volume of the moved bundle of timber. The resistance skidder and adhesion depend not only on soil properties and mover, but also from the impact of propulsion on the ground. When the specific pressure of the engine increases on the support surface, the soil is compressed, its sediment develops; due to the tangent load, shear deformations develop during the movement of the machine, up to the cutting and milling of the soil. In practice, these phenomena are rarely taken into account, which leads to a decrease in the accuracy of the calculation. But this must be taken into account when determining the planned productivity of skidding, and, accordingly, the entire complex of logging machines. The article analyzes the performance of the timber skidding operation, reveals the relationship between the traction properties and the pressure of forest machinery propellers on the ground. Based on the results of the calculations, the dependence of the coefficients of resistance to movement and adhesion on the pressure of the engine on the support surface and its mechanical properties, characterized by load-bearing capacity, for three types of engines: wood, wheel-tracked and tracked. With this in mind, the refined relationships for calculation of allowable bundles telemig timber dependency-based resistance and traction of the specific pressure on the contact patch of the mover with the support surface. The dependences are obtained based on the solution of the equation of uniform movement of the skidding system along an inclined drag, in which the coefficients of resistance and adhesion are expressed as linear functions of the ratio of the pressure of the mover and the load-bearing capacity of the soil.

Key words: forest soils, productivity, logging, forwarder, traffic resistance.

References

1. Grigorev I. V. [Parameters and performance indicators of a promising forwarder for low-volume logging] // Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice]. 2018. Vol. 6. No. 4 (40). Pp. 21-25. (InRuss.).
2. Grigorev I.V., CHurakov A.A. [Improvement of the design of an active forwarder semi-trailer based on an agricultural wheeled tractor] // ransportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii. Otv. red. N. S. Zaharov [Transport and transport-technological systems. Materials of the International Scientific and Technical Conference. Resp. N. S. Zakharov]. 2018. pp. 84-88. (InRuss.).
3. Grigorev I. V. [Features of operation of forest machines in severe frosts] // Novye materialy, oborudovanie i tekhnologii v promyshlennosti. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii molodyh uchenyh. Glavnyj redaktor I.S. Sazonov [New materials, equipment and technologies in industry. Materials of the international scientific and technical conference of young scientists. Editor-in-chief I. S. Sazonov]. 2018. pp. 102. (InRuss.).
4. Grigorev I. V. [Service contracts for modern forest machines] // Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa. Materialy Pyatoj Vserossijskoj nacional'noj nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem [Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the Fifth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation]. 2019. pp. 26-28. (InRuss.).
5. Grigorev I.V., ZHukova A.I. [Coordinate-volume tracing Technique for the development of cutting areas by skidding] // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal [news of higher educational institutions. Forest magazine]. 2004. № 4. C. 39-44. (InRuss.).
6. Dmitrieva M. N., Grigorev I. V., Lukhminsky V. A., Kazakov D. P., Hahina A.M. [Experimental studies of the cone index and physical and mechanical properties of a swampy grunt] // Lesotekhnicheskij zhurnal [Forest Engineering journal]. 2017. Vol. 7. No. 4 (28). Pp. 167-174. (InRuss.).
7. SHapiro V.YA., Grigorev I.V., ZHukova A.I., Ivanov V.A. [Investigation of mechanical processes of cyclic compaction of soil under dynamic loads] // Vestnik KrasGAU [KrasGAU bulletin]. 2008. № 1. pp. 163-175. (InRuss.).
8. SHapiro V.YA., Grigorev I.V., ZHukova A.I. [Assessment of soil deformation processes during cyclic compaction] // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal [news of higher educational institutions. Forest magazine]. 2008. № 4. pp. 7. (InRuss.).
9. SHapiro V.YA., Grigoreva O.I., Grigorev I.V., Grigorev M.F. [Theoretical study of the process of destruction of the soil mass with spherical knives when using combined structures of soil throwers for extinguishing forest fires] // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal [news of higher educational institutions. Forest magazine]. 2018. № 1 (361). pp. 61-69. (InRuss.).
10. Dobrecov R.YU., Grigorev I.V. [Promising transmissions of forest tracked vehicles] // Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa. Materialy IV Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. [Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation] 2018. C. 57-58. (InRuss.).
11. Zhuk A.Yu., Hahina A.M., Grigorev I.V., Ivanov V.A., Gasparyan G.D., Manukovsky A.Y., Kunitskaya O.A., Danilenko O.K., Grigoreva O.I. Modelling of indenter pressed into heterogeneous soil // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. T. 13. № S8. C. 6419-6430.
12. Rudov S.E., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Druzyanova V.P., Pekhutov A.S., Ivanov A.P., Ivanov A.K., Okhlopko M.K., Pankov V.Yu., Borovikov R.G. Specific features of accounting of state of the massive of the frozen soil grounds under cyclic loads // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2019. T. 25. № S2. pp. 191-205.
13. Dmitrieva M.N., Grigorev I.V., Rudov S.E. [Analysis of studies of the interaction of the wheel drive of forest vehicles with low-bearing soil] // Resources and Technology. 2019. T. 1. № 16. pp. 10-39. (InRuss.).
14. Grigorev M.F., Grigoreva A.I., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Stepanova D.I., Savvinova M.S., Sidorov M.N., Tomashevskaya E.P., Burtseva I.A., Zakharova O.I. Experimental findings in forest soil mechanics. EurAsian Journal of BioSciences. 2018. T. 12. № 2. pp. 277-287.
15. Bozhbov V.E., Grigorev I.V., Rudov S.E., Teterevleva E.V., CHemshikova YU.M. [Analysis of approaches to the description of the processes of interaction between the propellers of forest machines and the soils of cutting areas] // Resources and Technology. 2019. T. 16. № 2. pp. 13-35. (InRuss.).

16. Larin V. V. Methods of predicting the reference passability of multi-axis wheeled vehicles on the ground: dis. ... Dr. Techn. science: 05.05.03-M.: 2007. - 530 p. (InRuss.).

17. Grigorev I.V., Vojnash S.A. [Improving the efficiency of training forest machine operators] // Lesoekspluatatsiya i kompleksnoe ispol'zovanie drevesiny. Sbornik statej Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. [Forest exploitation and integrated use of wood. collection of articles of the all-Russian scientific and practical conference. Krasnoyarsk], 2020. pp. 62-66. (InRuss.).

18. Ageikin Ya. S. [Passability of cars] -M.: Mashinostroenie [Mechanical engineering], 1981. - 232 p. (InRuss.).

19. Grigorev I.V., Churakov A.A., Grigoreva O.I. [A promising design of a tracked forwarder] // Transportnye i transportno-tehnologicheskie sistemy. materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii [Transport and transport-technological systems. materials of the international scientific and technical conference]. 2017. pp. 140-144. (InRuss.).

20. Grigorev I.V., Grigoreva O.I. [Practice of training forest machine operators in Russia] // Innovacii v himiko-lesnom komplekse: tendencii i perspektivy razvitiya. Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Otvetstvennye redaktory YU.A. Bezrukih, E.V. Mel'nikova [Innovations in the chemical and forest complex: trends and prospects for development. Materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation. Responsible editors Yu. A. Bezrukih, E. V. Melnikova]. 2017. pp. 182-185. (InRuss.).

© **Burmistrova O.N.** – Grand PhD in Engineering sciences, professor, head of the Department of Technology and machines lumbering and engineering and geodesy, «Ukhta State Technical University» (USTU), e-mail: olga.burm@mail.ru; **Prosuzhih A. A.** – Senior Lecturer of the Department of Technology and machinery of logging and engineering geodesy, «Ukhta State Technical University» (USTU), e-mail: chemshikova79@mail.ru; **Hitrov E.G.** – PhD of Technical Sciences, Associate Professor of the Higher School of Intelligent Systems and Supercomputing Technologies, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, e-mail: yegorkhitrov@gmail.com; **Rudov S.E.** – PhD of Technical Sciences, Senior Lecturer of the № 3, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny, e-mail: 89213093250@mail.ru; **Kunitskaya O.A.** – Grand PhD in Engineering sciences, professor of the Department of Technologies and equipment of the forest complex, Arctic State Agrotechnological University (ASATU)), e-mail: ola.ola07@mail.ru; **Kalita O.N.** – Senior Lecturer of the Department of Forest management and landscape construction technologies, Pacific State University (PSU)), e-mail: o.n.kalita@mail.ru.

УДК 630*232

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫБОРА СИСТЕМЫ МАШИН ДЛЯ СОЗДАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛЕСНЫХ ПЛАНТАЦИЙ

О.Б. Марков, Р.В. Воронов, А.Б. Давтян, И.В. Григорьев, Г.А. Калита

История создания лесных плантаций различного назначения уже почти век. Во многих странах мира начали уделять внимание и начались исследования в области выращивания лесных плантаций с коротким оборотом рубки, с середины двадцатого века, с целью получения фитомассы для нужд энергетики. Значительное внимание этой проблеме начали уделять в странах Европы, Америки, Азии, Африки, Океании, и в Австралии. В зависимости от природно-производственных, прежде всего климатических условий, плантации энергетического назначения имеют оборот рубки от 2 до 15 лет. Первые целевые энергетические плантации в исследовательских целях были посажены в США, затем в Германии и Югославии, а затем в Швеции. Современное экологическое законодательство многих развитых стран мира нацелено на поддержание и всемерное развитие такого вида лесопромышленного бизнеса, как плантационное лесовыращивание. И, как показывает опыт многих стран, этот вид бизнеса может быть весьма эффективным, особенно если он совмещается с агролесоводством (лесным фермерством). В России нет опыта выращивания целевых лесных плантаций. Начавшиеся эксперименты в этой сфере закончились с развалом СССР. Но огромные площади заброшенных земель сельскохозяйственного назначения, на которых уже есть необходимая для развития этого бизнеса инфраструктура (здания, дороги, и т.д.), а также есть местный кадровый потенциал, на фоне постоянно растущего плеча вывозки заготовленной древесины из естественных лесов, делают это направление очень перспективным для условий нашей страны.

Современные машины, предлагаемые рядом иностранных компаний, позволяют сделать создание и эксплуатацию лесных плантаций достаточно высокотехнологичным производством, но для выбора наиболее оптимальной системы машин, в конкретных природно-производственных условиях, необходимо иметь обоснованный алгоритм принятия решений. В статье разработана математическая модель, позволяющая оптимизировать выбор системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций в конкретных природно-производственных условиях.

Ключевые слова: лесные плантации, системы машин, модульный принцип построения систем машин.

Введение

Плантационное лесоводство в Российской Федерации в настоящее время не развивается. Причинами такой ситуации является не совершенство законодательства, отсутствие государственной поддержки и научно обоснованной системы принятия решений при эксплуатации лесной плантации. В России есть большие площади заброшенных земель сельскохозяйственного назначения, в разное время выведенных из оборота, заросших или зарастающих древесно-кустарниковой растительностью. Одним из весьма эффективных вариантов их использования могут быть энергетические лесные плантации или лесные плантации другого назначения.

Этот вид лесопромышленного бизнеса может успешно совмещаться, как во времени, так и в пространстве, с производством пищевой продукции (агролесоводство), что регламентируется достаточно свежим Приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 02.07.2020 № 408 «Об утверждении Правил использования лесов для ведения сельского хозяйства и Перечня случаев использования лесов для ведения сельского хозяйства без предоставления лесного участка, с установлением или без установления сервитута, публичного сервитута».

Важность целевого, плантационного выращивания древесины для Российской Федерации в настоящее время обуславливается значительным истощением лесосырьевой базы в естественных лесах, что все сильнее ощущается лесопромышленными компаниями. В одном из выступлений руководитель лесного отдела Гринпис, А.Ю. Ярошенко отметил «хозяйственно ценные и экономически доступные леса страны истощены до предела, и уже не могут надолго обеспечить сырьем лесоперерабатывающие предприятия. Выживание большинства предприятий российского лесного комплекса можно обеспечить только за счет перехода к полноценному лесному хозяйству - эффективному выращиванию хозяйственно ценных лесов на наиболее продуктивных лесных землях в районах с благоприятным климатом, достаточными трудовыми ресурсами и сколько-нибудь развитой инфраструктурой». Здесь уместно отметить, что большая часть заброшенных в настоящее время земель сельскохозяйственного назначения как раз обеспечена достаточными трудовыми ресурсами и достаточно развитой инфраструктурой, по сравнению с землями лесного фонда.

Кроме этого, практически все лесопромышленники отмечают сильную забюрократизированность процессов лесопользования, которая на землях сельскохозяйственного назначения значительно меньше.

С другой стороны, Федеральный закон от 31.07.2020 № 308-ФЗ «О внесении изменений в статью 22 Федерального закона «О безопасном обращении с пестицидами и агрохимикатами» и Федеральный закон «О государственном регулировании обеспечения плодородия земель сельскохозяйственного назначения», может оказать существенное негативное влияние на выращивание древесины на землях сельскохозяйственного назначения, в случаях, если по результатам почвенных, геоботанических и других обследований земель сельскохозяйственного назначения, предусмотренных этим документом, будут приниматься решения о необходимости раскорчевки земель заросших древесно-кустарниковой растительностью.

К сожалению, достаточно часто чиновники забывают, что в масштабах Российской Федерации, при наличии более 50 млн. га заброшенных сельскохозяйственных земель, в основном в Нечерноземье, плантационное лесовыращивание на них могло бы дать возможность выращивать до 300 млн. м³ древесины в год, и поддерживать до ста тысяч постоянных рабочих мест – а это очень не мало для сельской местности.

Большим законодательным прорывом 2020 г. в области плантационного лесовыращивания в России явилось Постановление Правительства Российской Федерации от 21.09.2020 № 1509 «Об особенностях использования, охраны, защиты, воспроизводства лесов, расположенных на землях сельскохозяйственного назначения». Данный документ хотя составлен и не без огрехов, и без широкого обсуждения с заинтересованными сторонами, все же внушает уверенность, что развитие очевидно

необходимого направления лесопромышленного бизнеса – целевого выращивания древесины сдвинулся с мертвой точки. Правда принятое на три дня раньше Постановление Правительства РФ от 18.09.2020 № 1482 «Признаки неиспользования земельных участков из земель сельскохозяйственного назначения по целевому назначению или использования с нарушением законодательства Российской Федерации», оставляет некоторые опасения в том, что новая законодательная база будет работать по отношению к плантационному лесовыращиванию на землях сельскохозяйственного назначения по принципу «лебедь, рак, и щука».

В Европе, при оценке инвестиционного проекта по созданию и эксплуатации лесных плантаций приняты различные нормативы, которым данный проект должен соответствовать. Например, в Венгрии разрешения на посадку энергетических насаждений выдается на основании Указа Правительства от 2007 г., в котором записано, что древесные энергетические насаждения должны иметь площадь не менее 0,15 га. У таких насаждений порослевого происхождения максимальный возраст рубки должен составлять 5 лет, а у посадок стволового происхождения 15 лет [1, 2]. Также в нормативах прописан алгоритм выбора выращиваемой древесной породы (клона), технологии выращивания, выбора удобрений, вывода земель в другое целевое пользование, после прекращения плантационного лесовыращивания.

Выбор системы машин, для создания и эксплуатации лесных плантаций, прежде всего, должен базироваться на экономических критериях оценки. Для условий России, для достижения целей программы импортозамещения, очень желательно, чтобы большинство машин и агрегатов производились в нашей стране. И несмотря на практически полное уничтожение лесного машиностроения в России, именно для лесных плантаций этого не очень сложно добиться, поскольку производство сельскохозяйственной техники в нашей стране на подъеме [3].

Немаловажным критерием оценки оптимальности компоновки системы машин для рассматриваемых целей будет и показатель энергетической эффективности, обоснованный участниками научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» [4]. В основе этого критерия лежит концепция продуктивности экологических систем - процесс промышленного выращивания лесной продукции, который заканчивается появлением определенного количества того или иного продукта.

По определению, лесные плантации относятся к экосистемам движимым Солнцем с естественными и искусственными энергетическими субсидиями. Дополнительные энергетические субсидии тратятся на выращивание и сбор урожая - различные операции по выращиванию целевой древесно-кустарниковой растительности, к основным из которых относятся: подготовка территории под посадку; включая необходимые мелиоративные мероприятия и удобрение; посадку (посев) насаждений; уход за посадками; дополнительное внесение удобрений; заготовку выращенной древесины; ее доставку до потребителей и подготовку к целевому использованию, например, рубку в топливную щепу.

Разработка математической модели, позволяющей оптимизировать выбор системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций в конкретных природно-производственных условиях является актуальной задачей лесопромышленного производства Российской Федерации.

Результаты исследования

Оценка энергетических затрат на создание и эксплуатацию любой лесной плантации не вызывает сложностей. Оценка калорийности древесины различных пород является справочной информацией. Тогда, как показано в [5] разность между затратами энергии на все фазы получения продукции лесной плантации и энергетической ценностью этих продуктов, даст возможность оценить оптимальность компоновки систем машин. То есть,

$$W_{np} - W_{затр} = W_{эф}, \quad (1)$$

где: W_{np} – энергетическая ценность полученной продукции плантации; $W_{затр}$ – затраты на все фазы получения продукции плантации; $W_{эф}$ – энергетический эффект процесса выращивания и эксплуатации лесной плантации.

Данный подход особенно прост и эффективен, если речь идет о лесной плантации энергетического назначения [6].

Система принятия решений по оптимальному выбору системы машин, результаты работы которой соответствовали бы не только критериям не только энергетической, но и экономической эффективности нуждается в методологической поддержке. Поэтому требуется создать систему принятия решений

позволяющую методом перебора подбирать агрегаты для организации плантации лесных древесных пород таким образом, чтобы при завершении цикла выращивания получить максимальную прибыль. При этом необходимо учитывать начальную стоимость эксплуатации машин и оборудования, стоимость их эксплуатации и техническую готовность («стоимость владения»), амортизацию, и продолжительность эксплуатации.

В зависимости от вида почвогрунта, засоренности площади и целевой породы для каждого этапа создания лесной плантации назначается набор технологических операций [7]. Для каждой операции задается ряд возможных агрегатов (технологического оборудования) для ее выполнения [8].

Большая часть технологических операций носят выраженный сезонный характер, например, посадка, прополка, внесение удобрений [9]. Технологическое оборудование для выполнения этих операций значительную часть времени не используется. Некоторые операции, в соответствии с погодными условиями, могут выполняться большую часть теплого сезона [10]. А заготовку выращенной древесины, в том числе и для предохранения почвенного слоя плантации от повреждений машинами, лучше выполнять в зимний период.

Возможно несколько вариантов, подбора и использования машин и технологического оборудования. Математически, это будут отношения вида технологическая операция – агрегат имеют тип много ко многим. Иначе говоря, одна и та же операция может быть произведена разными агрегатами, и одна машина с установленным оборудованием может использоваться для выполнения различных технологических операций [11]. Например, на трактор можно устанавливать различные виды навесного оборудования: плуги, корчеватели, скарификаторы, опрыскиватели, фрезы, мульчеры, сажалки и т.д. [9], т.е. исходить из модульного принципа составления системы машин. Для решения поставленной задачи целесообразно применить методы математического моделирования и оптимизации [12, 13], также используемые для обоснования выбора параметров и показателей работы машин на лесопромышленных предприятиях [15, 16].

Введем обозначения математической модели:

n – число технологических операций полного цикла создания и эксплуатации лесной плантации;

N – множество номеров элементов операций;

N_t – множество номеров элементов операций этапа t , $N_t \subset N$, $t = 1, \dots, n$;

M – множество номеров всех подходящих для выполнения операций агрегатов;

Q – множество номеров применяемых машин/, агрегируемых технологическим оборудованием;

R_{MN} – отношение, определяющее связи между технологическими операциями и выполняющими их машинами с технологическим оборудованием, $R_{MN} \subset M \times N$;

A – матрица отношения R_{MN} , состоящая из элементов a_{ij} , $i \in M, j \in N$, где $a_{ij} = 1$, если технологическая операция j может быть выполнена i -м оборудованием, а если не может быть выполнена, то $a_{ij} = 0$;

R_{QM} – отношение, определяющее связи между машинами и технологическим оборудованием, $R_{QM} \subset Q \times M$;

B – матрица отношения R_{QM} , состоящая из элементов b_{qi} , $q \in Q, i \in M$, где $b_{qi} = 1$, если i -тый агрегат включает в себя оборудование q , и, соответственно, $b_{qi} = 1$, если не включает.

При этом входными параметрами модели будут являться:

S – площадь участка, отведенного под создание лесной плантации (га);

w_{ij} – производительность конкретного агрегата $i \in M$ при выполнении определенной операции $j \in N$ (га/ч);

T_t – предельное время, отводимое на выполнение определенного этапа t , $t = 1, \dots, n$;

C_q – цена определенной единицы оборудования $q \in Q$ (руб.);

c_i – затраты на эксплуатацию определенного агрегата $i \in M$ во время его работы (топливно-смазочные материалы, зарплата, амортизация) (руб./ч);

c_q – затраты на ремонт и техническое агрегата $q \in Q$, (руб./ч).

Неизвестными переменными математической модели будут являться:

x_q – число единиц технологического оборудования типа q , используемых в этапе, $q \in Q$;

U_{ij} – логическая переменная, $U_{ij} = 1$, если i -тый агрегат используется для выполнения определенной операции $j \in N$, и, соответственно, $U_{ij} = 0$, если не используется, $i \in M$;

Z_{ij} – число агрегатов типа i , используемых для выполнения определенной операции $j \in N$, $i \in M$;

τ_i – время выполнения определенной операции $j \in N$;

При постановке оптимизационной задачи получим целевую функцию, определяемую минимумом расходов на приобретение и эксплуатацию необходимых машин и оборудования:

$$\sum_{q \in Q} C_q x_q + \sum_{j \in N} \sum_{i \in M} (c_i + \sum_{q \in Q} c_q b_{qi}) \tau_j z_{ij} \rightarrow \min. \quad (2)$$

На каждом этапе используемые агрегаты за определенное время эксплуатации выполняют весь объем работ:

$$S = \sum_{i \in M} w_{ij} \tau_j z_{ij}, \quad j \in N. \quad (3)$$

Время на выполнение этапа t ограничено:

$$\sum_{j \in N_t} \tau_j \leq T_t, \quad t = 1, \dots, n.$$

Для выполнения каждой операции должен применяться один тип агрегата:

$$\sum_{i \in M} U_{ij} = 1, \quad j \in N. \quad (4)$$

Все операции должны выполняться на предназначенном для этого агрегате:

$$0 \leq U_{ij} \leq a_{ij}, \quad i \in M, j \in N.$$

Количество используемых агрегатов является целым числом:

$$U_{ij} - \text{целое}, \quad i \in M, j \in N.$$

Машина агрегируется определенным технологическим оборудованием при условии их применения:

$$0 \leq Z_{ij} \leq D U_{ij}, \quad i \in M, j \in N,$$

где D – достаточно большое постоянное число, которое заведомо больше, чем любое возможное значение переменной Z_{ij} .

Число единиц зависит от числа используемых агрегатов:

$$x_q \geq b_{qi} Z_{ij}, \quad q \in Q, i \in M, j \in N.$$

В представленной математической модели предполагается, что вид плантации, целевая порода уже заданы и известно количество выращиваемой на участке древесины и оборот рубки. После решения поставленной оптимизационной задачи требуется выполнить сравнение стоимости полученной древесной фитомассы и понесенных расходов на создание и эксплуатацию лесной плантации. Если плантация имеет энергетическое назначение, то стоит произвести и оценку энергетической эффективности, по выражению (1).

Период, сроки, объемы выполнения отдельных видов работ могут задаваться специальным программным комплексом, аналогичным современным прикладным программам сельскохозяйственного производства, например, «AGRO-Net NG», «AGRO-Map PF», «Аграр Офис», «Панорама АГРО», и т.д.

Достаточно наглядным вариантом для сравнения может являться сравнение традиционной для Российской Федерации системы машин и технологии подготовки почвы на вырубках при проведении искусственного лесовосстановления, предусматривающей использование лесных плугов различной конструкции, бульдозеров, а также скандинавского варианта, включающего дисковые культиваторы, культиваторы дискретного микроповышения, посадочные головки, агрегируемые, например, с форвардерами. Такие агрегаты производят и поставляют в Россию компании Bracke Forest AB (Швеция) и SIA «UOT» (Латвия).

При использовании лесных плугов (рис. 1), для их успешной работы, необходимо высокое качество проведения предварительных работ по мелиорации (уборка пней, камней и т.д.), кроме этого, лесные плуги имеют небольшую производительность, проблемы с надежностью, зато имеют достаточно низкую стоимость.



Рис. 1. Трактор с агрегированным лесным плугом

Конечно, дисковые культиваторы (рис. 2), культиваторы дискретного микроповышения, посадочные головки импортного производства стоят ощутимо дороже лесных плугов, но к их несомненным преимуществам можно отнести низкие требования к качеству проведения предварительной мелиорации (допускается наличие пней, камней, порубочных остатков и т.д.), высокое качество подготовки почвы (всхожесть семян и приживаемость саженцев (сеянцев) – до 100 %), высокая производительность, возможность обработки заболоченных почвогрунтов, возможность подготовки почвы и посева семян (в случае создания плантации посевом) за один проход.



Рис. 2. Форвардер агрегированный с двухрядным дисковым культиватором

По данным компании Тимбермаш Байкал, являющейся дилером компании Bracke Forest AB, по результатам работы оборудования этой компании в Иркутской области, получены следующие результаты экономического сравнения (табл. 1).

Таблица 1 - Экономическая эффективность систем машин на подготовке почвы под искусственное лесовосстановление

Показатель	Бульдозер	Лесной плуг	Дисковый культиватор
Стоимость, руб.	10000000	2500000	14500000
Часовая производительность, га/ч	0,25	0,35	1,5
Средняя себестоимость обработки га, руб/га	9500	8500	3000
Средняя площадь подготовки почвы в год, га	450	550	1250
Годовая экономия при использовании культиватора, руб/год	8125000	6875000	-

Экономическая целесообразность выращивания быстрорастущей мягколиственной древесины с коротким, по сравнению с хвойными древесными породами, оборотом рубки для последующего производства продукции прессованного древесного топлива, или, например, модифицированной древесины и изделий из нее, или технологической щепы, рассмотрена в [17-23].

Также весьма целесообразно оценить эффект от многоцелевого использования площади, отведенной под лесную плантацию, при использовании технологии и принципов агролесоводства [24].

Выводы

Создание и эксплуатация лесных плантаций является одним из наиболее перспективных вариантов повышения эффективности лесного комплекса РФ, а также перспективным путем развития сельских территорий, улучшения экологической обстановки. Одним из сдерживающих факторов создания и эксплуатации лесных плантаций в России является отсутствие обоснованной системы принятия решений по комплектованию парка машин для выполнения всего комплекса операций, в конкретных природно-производственных условиях.

Представленная в статье математическая модель учитывает многие факторы создания и эксплуатации лесных плантаций, интересна в качестве примера принципа комплектования парка машин.

Литература

1. Вагвелди А. Выращивание и эксплуатация лесных плантаций /А. Вагвелди, Ш. Фехер, Б. Хорват, С. Коман, Г. Ковач, Л. Сабо, И. Цупи, И.В. Григорьев, О.И. Григорьева, Д. Данилов, О. А. Куницкая, Е. Криваш - Издательство: University of West Hungary Pres. 2016. -132 с.
2. Kunickaya O., Tanyukevich V.V., Khmeleva D.V., Kulik A., Runova E.M., Savchenkova V., Voronova A.M., Lavrov M.F. Cultivation of the targeted forest plantations // Journal of Environmental Treatment Techniques. 2020. Т. 8. № 4. С. 1385-1393.
3. Давтян А.Б., Куницкая О.А., Григорьев М.Ф., Степанова Д.И., Григорьева А.И. Основы повышения эффективности систем машин для создания и эксплуатации лесных плантаций // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2020. № 56. С. 19-22.
4. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Никифорова А.И., Куницкая О.А. Обоснование методики оценки экологической эффективности лесопользования // Вестник КрасГАУ. 2012. № 6 (69). С. 72 -77.
5. Григорьев И.В., Хитров Е.Г., Никифорова А.И., Григорьева О.И., Куницкая О.А. Определение энергоемкости продуктов лесопользования в рамках методики оценки экологической эффективности лесопользования // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2014. Т. 19. № 5. С. 1499-1502.
6. Давтян А.Б., Куницкая О.А., Григорьев М.Ф., Степанова Д.И. Оценка эффективности создания и эксплуатации энергетических лесных плантаций // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе. Материалы международной научно-практической конференции. 2019. С. 61-65.

7. Григорьева О.И., Нгуен Ф.З. Лесные плантации для сырьевого обеспечения деревоперерабатывающих предприятий // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы третьей Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2017. С. 59-61.
8. Нгуен Ф.З., Григорьева О.И. Лесные плантации в лесопромышленном производстве Республики Вьетнам // Повышение эффективности использования и воспроизводства природных ресурсов: Материалы научно-практической конференции. 2016. С. 48-51.
9. Григорьев В.И. Лесные плантации в Азиатско-Тихоокеанском регионе // Наука и инновации: векторы развития: Материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых. Сборник научных статей. В 2-х книгах. 2018. С. 75-78.
10. Гаспарян Г.Д., Давтян А.Б. Транспортно-технологические машины для разработки энергетических лесных плантаций // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Международной научно-технической конференции. 2019. С. 56-60.
11. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Вернер Н.Н. Системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2017. Т. 5. № 5 (31). С. 438-443.
12. Никифорова О.И., Нгуен Ф.З. Перспективы развития систем машин для плантационного лесопользования в Республике Вьетнам // Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона: материалы II международного научно-практического форума. 2017. С. 225-230.
13. Воронов Р.В., Марков О.Б., Григорьев И.В., Давтян А.Б. Математическая модель модульного принципа подбора системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019. № 5 (371). С. 125-134.
14. Давтян А.Б. Особенности оценки оптимальности компоновки систем машин для создания и эксплуатации энергетических лесных плантаций // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Пятой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием. 2019. С. 31-32.
15. Воронова А.М., Воронов Р.В., Пискунов М.А. Моделирование схемы волоков при помощи покрытия гиперсети взвешенным корневым деревом // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2012. № 2 (123). С. 114-117.
16. Воронов Р.В., Косицын Д.П., Шабаев А.И., Воронова А.М., Щеголева Л.В. Математическая модель задачи планирования многопередельного производства в лесопромышленном комплексе // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2013. № 4 (133). С. 101-104.
17. Куницкая О.А., Пудова Т.М., Никитина Е.И. Перспективные направления переработки низкотоварной древесины и древесных отходов в Республике Саха (Якутия) // Потенциал науки и образования: современные исследования в области агрономии, землеустройства, лесного хозяйства. 2019. С. 14-18.
18. Kunitskaya O.A., Shadrin A.A., Kremleva L.V., Mueller O.D., Ivanov V.A., Bederdinova O.I., Kruchinin I.N., Burgonutdinov A.M., Zakharova O.I., Struchkov N.A. Modeling of the processes of the modification of the current volume warming by drainage and pressing // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2019. T. 25. № S2. С. 167-177.
19. Kunitskaya O.A., Shadrin A.A., Burmistrova O.N., Markov O.B., Gasparyan G.D., Davtyan A.B., Lapshina M.L., Sleptsova N.A., Ustinova V.V., Kruzhilin S.N. Wood treatment with hydro impact: a theoretical and experimental study // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2019. T. 25. № S2. С. 158-166.
20. Kunickaya O., Sidorov M., Fedorova P., Burmistrova O., Nazarova I., Hertz E., Ivanov V., Tanyukevich V., Semenyutina A., Ohlopkova M. Using machine vision to improve the efficiency of lumber mills // Journal of Physics: Conference Series. Ser. "International Conference on Future of Engineering Systems and Technologies" 2020. С. 012020.
21. Kunitskaya O.A., Zhuk A.Yu., Nikiforova V.A., Chzhan S.A., Gorodnichina M.Yu., Runova E.M., Garus I.A., Ivanov V. Reducing energy consumption of barkwood waste grinding on equipment with knife-based operational units // Journal of Applied Engineering Science. 2020. T. 18. № 3. С. 364-371.
22. Власов Ю.Н., Куницкая О.А., Григорьев М.Ф., Степанова Д.И., Григорьева А.И. Экспериментальные исследования энергоемкости прессования коро-древесных отходов // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2020. № 57. С. 25-28.

23. Куницкая О.А. Оценка экономики производства древесных пеллет в России // Потенциал науки и образования: современные исследования в области агрономии, землеустройства, лесного хозяйства. 2019. С. 27-32.

24. Григорьева О.И., Давтян А.Б. Иностранный опыт агролесоводства для повышения эффективности лесопользования // Наука и инновации: векторы развития: Материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых. Сборник научных статей. В 2-х книгах. 2018. С. 82-85.

© **Марков О.Б.** – канд. техн. наук, доцент кафедры транспортных и технологических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ПГУ»), e-mail: markovob@yandex.ru; **Воронов Р.В.** – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры прикладной математики и кибернетики ФГБОУ ВО «ПГУ», e-mail: rvoronov76@gmail.com; **Давтян А.Б.** – аспирант ФГБОУ ВО «Братский государственный университет» (ФГБОУ ВО «БГУ»), e-mail: armen_davtyan_2019@inbox.ru; **Григорьев И.В.** – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии и оборудования лесного комплекса, ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет» (ФГБОУ ВО «АГАТУ»), e-mail: silver73@inbox.ru; **Калита Г.А.** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии лесопользования и ландшафтного строительства, ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ТГУ»), e-mail: g.kalita@mail.ru.

UDC 630*232

MATHEMATICAL MODEL FOR SELECTING A SYSTEM OF MACHINES FOR CREATING AND OPERATING FOREST PLANTATIONS

O.B. Markov, R.V. Voronov, A.B. Davtyan, I.V. Grigoriev, G.A. Kalita

The history of the creation of forest plantations in Russia is almost a century old. In many countries of the world, attention has been paid and research has begun in the field of growing forest plantations with a short turn of logging, since the mid-twentieth century, in order to obtain phytomass for energy needs. Significant attention has been paid to this problem in Europe, America, Asia, Africa, Oceania, and Australia. Depending on natural and industrial conditions, especially climatic conditions, energy plantations have a logging turnover from 2 to 15 years. The first targeted energy plantations for research purposes were planted in the United States, then in Germany and Yugoslavia, and then in Sweden. Modern environmental legislation in many developed countries of the world is aimed at maintaining and fully developing such a type of timber business as plantation forest cultivation. And, as the experience of many countries shows, this type of business can be very effective, especially if it is combined with agroforestry (forest farming). There is no experience in growing targeted forest plantations in Russia. The experiments that started in this area ended with the collapse of the USSR. However, huge areas of abandoned agricultural land that already have the necessary infrastructure for the development of this business (buildings, roads, etc.), as well as local CAD-ROV potential, against the background of the ever-growing demand for the export of harvested wood from natural forests, make this direction very promising for the conditions of our country. Modern machines offered by a number of foreign companies make it possible to create and operate forest plantations in a fairly high-tech production, but to choose the most optimal system of machines, in specific natural production conditions, you need to have a well-founded decision-making algorithm. The article develops a mathematical model that allows optimizing the choice of a system of machines for creating and operating forest plantations in specific natural and industrial conditions.

Key words: forest plantations, systems of machines, modular principle of construction of systems of machines.

References

1. Vagveldi A., Fekher SH., Horvat B., Koman S., Kovach G., Sabo L., Cupi I., Grigorev I.V., Grigoreva O.I., Danilov D., Kunickaya O.A., Krivash E. [Cultivation and operation of forest plantations] - University of West Hungary Pres. 2016. -132 p. (InRuss.).
2. Kunickaya O., Tanyukevich V.V., Khmeleva D.V., Kulik A., Runova E.M., Savchenkova V., Voronova A.M., Lavrov M.F. Cultivation of the targeted forest plantations // Journal of Environmental Treatment Techniques. 2020. T. 8. № 4. pp. 1385-1393.

3. Davtyan A.B., Kunickaya O.A., Grigorev M.F., Stepanova D.I., Grigoreva A.I. [Fundamentals of improving the efficiency of machine systems for the creation and operation of forest plantations] // Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa [Actual problems of the forest complex]. 2020. № 56. pp. 19-22. (InRuss.).
4. Grigorev I.V., Grigoreva O.I., Nikiforova A.I., Kunickaya O.A. [Justification of the methodology for assessing the ecological efficiency of forest management] // Vestnik KrasGAU [KrasGAU Bulletin]. 2012. № 6 (69). pp. 72-77. (InRuss.).
5. Grigorev I.V., Hitrov E.G., Nikiforova A.I., Grigoreva O.I., Kunickaya O.A. [Determination of the energy intensity of forest products in the framework of the methodology for assessing the environmental efficiency of forest management] // Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki [Bulletin of the Tambov University. Series: Natural and technical Sciences]. 2014. T. 19. № 5. pp. 1499-1502. (InRuss.).
6. Davtyan A.B., Kunickaya O.A., Grigorev M.F., Stepanova D.I. [Assessment of the efficiency of creation and operation of energy forest plantations] // Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii [Energy efficiency and energy saving in modern production and society. Materials of the international scientific and practical conference]. 2019. pp. 61-65. (InRuss.).
7. Grigoreva O.I., Nguen F.Z. [Forest plantations for raw material supply of wood processing enterprises] // Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: Materialy tret'ej Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem [Improving the efficiency of the forest complex: Materials of the third all-Russian scientific and practical conference with international participation]. 2017. pp. 59-61. (InRuss.).
8. Nguen F.Z., Grigoreva O.I. [Forest plantations in the timber industry of the Republic of Vietnam] // Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya i vosproizvodstva prirodnih resursov: Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii [Improving the efficiency of use and reproduction of natural resources: Materials of the scientific and practical conference]. 2016. pp. 48-51. (InRuss.).
9. Grigorev V.I. [Forest plantations in the Asia-Pacific region] // Nauka i innovacii: vektory razvitiya: Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchenyh. Sbornik nauchnyh statej. V 2-h knigah [Science and innovation: vectors of development: Materials of the International scientific and practical conference of young scientists. Collection of scientific articles. In 2 books]. 2018. pp. 75-78. (InRuss.).
10. Gasparyan G.D., Davtyan A.B. [Transport and technological machines for the development of energy forest plantations] // Transportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy: Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii [Transport and transport-technological systems: Materials of the International scientific and technical conference]. 2019. pp. 56-60. (InRuss.).
11. Grigorev I.V., Grigoreva O.I., Verner N.N. [Machine systems for the creation and operation of forest plantations] // Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika [Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice]. 2017. Vol. 5. № 5 (31). pp. 438-443. (InRuss.).
12. Nikiforova O.I., Nguen F.Z. [Prospects for the development of machine systems for plantation forest management in the Republic of Vietnam] // Prirodnye resursy i ekologiya Dal'nevostochnogo regiona: materialy II mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo foruma [Natural resources and ecology of the far Eastern region: materials of the II international scientific and practical forum]. 2017. pp. 225-230. (InRuss.).
13. Voronov R.V., Markov O.B., Grigorev I.V., Davtyan A.B. [Mathematical model of the modular principle of selecting a system of machines for the creation and operation of forest plantations] // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal [News of higher educational institutions. Forest magazine]. 2019. № 5 (371). pp. 125-134. (InRuss.).
14. Davtyan A.B. [Features of evaluation of the optimal layout of machine systems for the creation and operation of energy forest plantations] // Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: materialy Pyatoj Vserossijskoj nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem [Improving the efficiency of the forest complex: materials of the Fifth all-Russian national scientific and practical conference with international participation]. 2019. pp. 31-32. (InRuss.).
15. Voronova A.M., Voronov R.V., Piskunov M.A. [Modeling of the haulage scheme by covering the hypernet with a weighted root tree] // Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta [Scientific notes of Petrozavodsk state University]. 2012. № 2 (123). pp. 114-117. (InRuss.).
16. Voronov R.V., Kosicyn D.P., SHabaev A.I., Voronova A.M., SHCHegoleva L.V. [Mathematical model of the problem of planning multi-line production in the timber industry] // Uchenye zapiski Petrozavodskogo

gosudarstvennogo universiteta [Scientific notes of Petrozavodsk state University]. 2013. № 4 (133). pp. 101-104. (InRuss.).

17. Kunickaya O.A., Pudova T.M., Nikitina E.I. [Promising areas of processing of low-quality wood and wood waste in the Republic of Sakha (Yakutia)] // Potencial nauki i obrazovaniya: sovremennye issledovaniya v oblasti agronomii, zemleustrojstva, lesnogo hozyajstva [Potential of science and education: modern research in the field of agronomy, land management, forestry]. 2019. pp. 14-18. (InRuss.).

18. Kunitskaya O.A., Shadrin A.A., Kremleva L.V., Mueller O.D., Ivanov V.A., Bederdinova O.I., Kruchinin I.N., Burgonutdinov A.M., Zakharova O.I., Struchkov N.A. Modeling of the processes of the modification of the current volume warming by drainage and pressing // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2019. T. 25. № S2. pp. 167-177.

19. Kunitskaya O.A., Shadrin A.A., Burmistrova O.N., Markov O.B., Gasparyan G.D., Davtyan A.B., Lapshina M.L., Sleptsova N.A., Ustinova V.V., Kruzhilin S.N. Wood treatment with hydro impact: a theoretical and experimental study // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2019. T. 25. № S2. pp. 158-166.

20. Kunickaya O., Sidorov M., Fedorova P., Burmistrova O., Nazarova I., Hertz E., Ivanov V., Tanyukevich V., Semenyutina A., Ohlopko M. Using machine vision to improve the efficiency of lumber mills // Journal of Physics: Conference Series. Ser. "International Conference on Future of Engineering Systems and Technologies" 2020. pp. 012020.

21. Kunitskaya O.A., Zhuk A.Yu., Nikiforova V.A., Chzhan S.A., Gorodnichina M.Yu., Runova E.M., Garus I.A., Ivanov V. Reducing energy consumption of barkwood waste grinding on equipment with knife-based operational units // Journal of Applied Engineering Science. 2020. T. 18. № 3. pp. 364-371.

22. Vlasov YU.N., Kunickaya O.A., Grigorev M.F., Stepanova D.I., Grigoreva A.I. [Experimental studies of the energy intensity of pressing bark and wood waste] // Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa [Actual problems of the forest complex]. 2020. № 57. pp. 25-28. (InRuss.).

23. Kunitskaya O.A. [Assessment of the economy of wood pellet production in Russia] // Potencial nauki i obrazovaniya: sovremennye issledovaniya v oblasti agronomii, zemleustrojstva, lesnogo hozyajstva [Potential of science and education: modern research in the field of agronomy, land management, forestry]. 2019. pp. 27-32. (InRuss.).

24. Grigoreva O.I., Davtyan A.B. [Foreign experience of agroforestry to improve the efficiency of forest management] // Nauka i innovacii: vektory razvitiya: Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchenyh. Sbornik nauchnyh statej. V 2-h knigah [Science and innovation: vectors of development: Materials of the International scientific and practical conference of young scientists. Collection of scientific articles. In 2 books]. 2018. pp. 82-85. (InRuss.).

© **Markov O.B.** – PhD of Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Transport and technological machines and equipment, Petrozavodsk State University (PSU), e-mail: markovob@yandex.ru; **Voronov R.V.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of Applied mathematics and Cybernetics, Petrozavodsk State University (PSU), e-mail: rvoronov76@gmail.com; **Davtyan A.B.** – Post-graduate student at the Bratsk State University (BSU), e-mail: armen_davtyan_2019@inbox.ru; **Grigoriev I.V.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of Technology and equipment of the forest complex, Arctic State Agrotechnological University (ASATU), e-mail: silver73@inbox.ru; **Kalita G.A.** – PhD of Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Forest management and landscape construction technologies, Pacific State University (PSU), e-mail: g.kalita@mail.ru.

УДК 630*232

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕГРАЦИЯ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

А.А. Тамби, И.В. Григорьев, А.Б. Давтян, А.В. Помигуев, О.Н. Калита, В.И. Григорьев

История отечественного лесного комплекса за последние 100 лет характеризуется положительной динамикой до 1990 г., последующим затяжным спадом до примерно, 2010 г., и очередным подъемом, наблюдаемым и в настоящее время. Положительная динамика развития лесного комплекса, как в XX, так и в XIX веке связана с укрупнением лесопромышленных предприятий, часто связанной с этим диверсификацией производства и продукции, снижением себестоимости работ. Период упадка

лесного комплекса России характеризуется дезинтеграцией крупных лесопромышленных предприятий, массовым банкротством отколовшихся от них составляющих, упадком смежных (обслуживающих) производств, потерей рабочих мест, снижением уровня жизни в населенных пунктах, связанных с лесной отраслью, и нарастающим техническим отставанием, приводящим к снижению качества и увеличению себестоимости выпускаемой продукции. Разработанные за последние годы новые технические и технологические решения для заготовки лесных ресурсов, деревообработки, лесовосстановления, а также новые виды продукции, производимые на основе древесины позволяют существенно повысить эффективность работы лесопромышленных предприятий. Но для технической и технологической модернизации требуются достаточно существенные капитальные вложения, которые под силу только крупным предприятиям с большим объемом заготовки и переработки древесины и других ресурсов леса. Этот аспект является одной из причин наблюдаемой в настоящее время горизонтальной и вертикальной интеграции предприятий лесного комплекса России. В статье рассмотрены предпосылки и преимущества интеграции лесозаготовительных и деревообрабатывающих предприятий, перспективы дальнейшего развития интеграционных процессов в лесной отрасли.

Ключевые слова: лесозаготовки, деревообработка, лесовосстановление, лесные плантации, интеграция лесопромышленных предприятий.

Введение

Термин «Интеграция» происходит от латинского слова «integratio» – восстановление. Это очень подходящий для рассматриваемого вопроса термин, в разрезе восстановления лесного комплекса Российской Федерации, после его глубочайшего упадка постсоветских времен.

Распад СССР, последовавшая за этим приватизация лесопромышленных предприятий, заводов лесного машиностроения, отраслевых НИИ и КБ, сначала привела к их дезинтеграции, разрыву хозяйственных связей, потере потребителей и рынков, последующему упадку и ликвидации многих из них. Если НИИ Лесного хозяйства и профильные учебные заведения, оставшись в государственном подчинении смогли пережить лихолетье постсоветских реформ (хотя к эффективности их работы в настоящее время есть очень серьезные вопросы), то машиностроительные предприятия лесопромышленного профиля, связанные с ними НИИ и КБ, практически не 100% прекратили свое существование. Некоторые, как ЦНИИЛесосплава, ликвидированы полностью, со всеми архивами, данными и разработками, на которые во времена СССР были затрачены огромные финансовые ресурсы. Оставшиеся, по сути, являются лишь носителями известных когда-то брендов. Не имея ни собственных зданий, ни научно-исследовательского оборудования, ни необходимого персонала, эти организации периодически получают государственные субсидии, в разных формах, на разработку той или иной документации, которая, как показывает практика, остается не востребованной.

Последовавшие за раздроблением крупных лесопромышленных предприятий перепродажи и рейдерские захваты мелких составляющих, при которых управляющими становились временщики, стремящиеся урвать сиюминутную прибыль, совершенно не думая о долгосрочной перспективе и развитии доставшегося им актива, привели к резкому снижению, а то и прекращению обновления парка машин и оборудования, не говоря уже о какой-нибудь существенной его модернизации.

Постепенное становление цивилизованных рыночных отношений в Российской Федерации, несмотря на непрофессиональное законодательное регулирование, привело к началу процессов восстановления лесопромышленных предприятий, их укрупнению (интеграции) в лесопромышленные холдинги [1]. Но возрождению отечественных предприятий лесного машиностроения, к сожалению, это никак не способствовало. С постепенным износом и выходом из строя парка машин, оставшихся со времен СССР, лесозаготовительные предприятия России стали закупать импортные лесные машины, поначалу бывшие в употреблении у зарубежных коллег. Впоследствии, особенно после введения заградительных на ввоз машин б/у, российские предприятия начали закупать новые лесные машины [2]. Но, с учетом их стоимости, это могли себе позволить только крупные предприятия, имеющие большую арендную базу, на которой эти машины могли работать круглогодично, в полную мощность.

Заготовка большого объема древесины в естественных лесах приводит к получению большого сортамента бревен, по породам, размерам, качеству, и назначению. Для их эффективной переработки необходим достаточно разнообразный набор линий и технологических процессов. И, как показала

практика, крайне желательно осуществлять заготовку и переработку древесины в рамках единой, вертикально-интегрированной структуры [3].

Действующий Лесной Кодекс РФ обязывает лесопользователей, использующих участки лесного фонда на правах долгосрочной аренды, проводить комплекс работ по лесовосстановлению и уходу за лесами. Федеральный закон от 19.07.2018 № 212-ФЗ «О внесении изменений в Лесной кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации в части совершенствования воспроизводства лесов и лесоразведения» (так называемый «Закон о компенсационном лесовосстановлении») обязал лесопользователей не занимающихся заготовкой и переработкой древесины, но производящих рубку трасс линейных объектов или разработку месторождений на землях лесного фонда, выполнять комплекс работ по компенсационному лесовосстановлению – посадке древесной растительности на непокрытых лесом площадях лесного фонда - на гарях, и т.д., не находящихся в аренде, в пределах субъекта Российской Федерации, в котором они осуществляют свою деятельность. Причем, значительная часть этого искусственного лесовосстановления должна выполняться с использованием посадочного материала с закрытой корневой системой, а для его получения, как и посадочного материала с открытой корневой системой, требуется создание высокотехнологичных, дорогостоящих питомников. Причем для предприятий и организаций, подпадающих под требования Закона о компенсационном лесовосстановлении, работы, связанные с посадкой древесной растительности, не являются профильными.

Помимо основного лесного ресурса – древесины, в течение срока ее выращивания, на тех же участках лесного фонда можно заготовить недревесную (пищевую) продукцию леса, кратно превышающую по стоимости выращенную древесину [4]. Это достаточно специфический и успешно развивающийся в последние годы вид лесопромышленного бизнеса. Как и очевидно перспективный – целевое выращивание древесины (лесные плантации), и, возможно, лесное фермерство (агролесоводство) – очень распространенное во многих странах мира.

Для эффективного, многоцелевого, использования участков лесного фонда, эффективной переработки древесины и других ресурсов леса, необходима дальнейшая интеграция лесопромышленных компаний, как вертикальная, так и горизонтальная.

Результаты исследования

Как известно, интеграция – это объединение технологически однородных производств (горизонтальная интеграция) или производств, образующих единую технологическую цепочку, начиная от обработки сырья и заканчивая выпуском готовых продуктов (вертикальная интеграция) [5]. Существуют разные способы интеграции — от поглощения конкурента до приобретения его контрольного пакета акций. Широко распространено перекрестное владение акциями разных компаний, объединение усилий в области управления, заключение договоров о консорциуме, все это делает интеграцию более гибкой, при необходимости.

Помимо сказанного выше, к усилению интеграционных процессов в лесном комплексе России приводит постепенное истощение запасов качественных круглых лесоматериалов в освоенных эксплуатационных лесах, и связанный с этим постоянный рост плеча вывозки заготовленной древесины, которое в Сибири и на Дальнем Востоке уже перевалило за 300 км. Рост плеча вывозки заготовленной древесины, помимо увеличения удельного расхода топлива на транспортировку обозначенного кубометра древесины и удельной амортизации автолесовозов, приводит к значительному росту себестоимости заготовленной древесины, связанному с необходимостью финансирования строительства и содержания большой сети лесовозных дорог. При этом, несмотря на длительные дискуссии в различных органах власти, перспектив на компенсацию затрат, связанных с развитием сети лесных дорог у лесопользователей так и нет [6]. Несмотря на относительно низкую ставку платы за лесной ресурс в России, заготавливаемая в естественных лесах древесина становится все менее конкурентоспособной по себестоимости, что хорошо иллюстрирует рисунок 1.

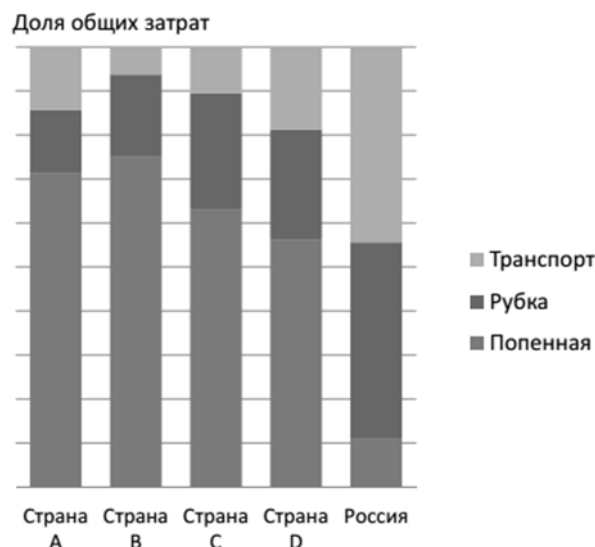


Рис. 1. Индикативный анализ себестоимости пиловочных бревен

Кроме того, постоянное удаление мест рубок спелых и перестойных насаждений от мест проживания персонала лесозаготовительных предприятий (участков) приводит к расширению использования вахтового метода организации лесозаготовительных работ, связанных с созданием вахтовых поселков, определенной инфраструктуры их обслуживания, что, в свою очередь, также увеличивает себестоимость заготовленной древесины [7]. Структура себестоимости круглых лесоматериалов в условиях наличия собственной арендной базы представлена на рисунке 2.



Рис. 2. Структура себестоимости круглых лесоматериалов в условиях наличия собственной арендной базы

Сложности лесозаготовительных предприятий, наряду с истощением доступных качественных ресурсов спелого леса, приводят к дефициту древесного сырья и для отечественных деревоперерабатывающих предприятий. Причем в складывающуюся ситуацию периодически приходится вмешиваться и на законодательном уровне. Например, в марте 2018 г. в Министерстве промышленности и торговли РФ состоялось заседание подкомиссии по таможенно-тарифному, нетарифному регулированию и защитным мерам во внешней торговле, на котором было принято решение о вводе временного ограничения экспорта фанерного кряжа сроком на два года. В течение 2017 г. Минпромторг изучал ситуацию с сырьем у российских фанерных предприятий, в результате была

выявлена отрицательная динамика обеспечения фанерным краем перерабатывающих производств и увеличение экспорта данного сырья в Китай. На определенное время эта мера позволила смягчить проблему дефицита фанерного сырья для отечественных фанерных комбинатов, но, очевидно, что это лишь временная отсрочка. Во многом это связано с некорректностью политики в области лесовосстановления – когда на месте вырубленного леса любого породного состава (кроме твердолиственных пород) производится восстановление хвойными породами, а также в отсутствии политики по выращиванию лиственных насаждений семенного происхождения [8, 9]. Решить эту проблему, очевидно, может развитие целевого (плантационного) выращивания древесины, как это принято в большинстве стран мира, включая Азиатско-Тихоокеанский регион [10-17].

В настоящее время наиболее востребованными круглыми лесоматериалами являются: Пиловочник хвойный, диаметров 14-38 см, Балансы, диаметром 6-24 см, а также Фанерные бревна, диаметром 18 и более см.

Накопление в арендных базах лесозаготовительных предприятий низкотоварной древесины (древесины себестоимость заготовки и транспортировки которой превышает ее продажную стоимость) требует широкого развития и внедрения технологических процессов и систем машин по ее эффективной переработке, как минимум для того, чтобы добавленная стоимость продукции, получаемой из такой древесины покрывала затраты на ее заготовку [18-21].

В 2009 г., на правительственном уровне был поставлен вопрос о широком развитии лесопроизводственного производства – сбора и переработки недревесной (пищевой) продукции леса. Данный вид лесного бизнеса уже достаточно широко развит в ряде субъектов РФ, но, как и работы по лесовосстановлению, носит ярко выраженный сезонный характер, и также требует достаточно специфических систем машин и оборудования.

Поскольку именно деревоперерабатывающие предприятия выпускают продукцию с наибольшей добавленной стоимостью, они способны взять на себя большую часть финансирования необходимых вложений в развитие сети лесных дорог, закупку нового и модернизацию существующего оборудования, диверсификацию производства и продукции, и даже подготовку и переобучение необходимых производственному процессу кадров.

Большинство деревоперерабатывающих компаний России, включая лесопильные, ориентированы на экспорт. Это обеспечивает им гарантированную отпускную стоимость производимой ими продукции и объемы потребления в евро и долларах, возврат НДС, снижение себестоимости производимой продукции за счет укрупнения объемов.

Эти преимущества привели к созданию холдингов, включающих собственные подразделения по заготовке древесины. При создании таких комплексных лесопромышленных предприятий на первый план при составлении бизнес-плана, выходит наличие и размерно-качественные характеристик древесного сырья в арендной базе и только потом выбор оборудования.

При этом потребители внутри страны ощущают планомерное повышение стоимости качественной продукции деревопереработки, включая пиломатериалы, вслед за стоимостью сырья и укреплением основных валют. Дефицит пиломатериалов у домостроительных компаний, не готовых приобретать пиломатериалы у крупных лесопильных компаний в больших объемах и по высокой стоимости.

При заготовке древесины в перестойных лесах, а также быстрорастущей мягколиственной древесины достаточно часто наблюдаются сложности с переработкой толстомерной древесины, вследствие недостаточного распространения ленточнопильной технологии в лесопилении.

Укрупнение объемов переработки древесины в рамках комплексных лесопромышленных предприятий позволяет концентрировать значительное количество коро-древесных отходов основного производства, из которых можно получать как прессованное биотопливо, так и различные продукты лесохимической переработки [22-25].

Хорошим примером интеграции лесопромышленных предприятий, при освоении удаленных от мест переработки древесины лесосек, является использование принципа временных лесных терминалов (непостоянных лесопромышленных складов, по советской классификации – 4НС). Известно, что во многом лимитирующим фактором объема воза лесоматериалов, вывозимого лесовозным транспортом, является его коэффициент полнодревесности. В возе сортиментов он не превышает 0,7. Следовательно, лесовоз на дальнюю дистанцию везет 30%, по объему воза, воздух, а также не менее 30% будущих отходов лесопиления – коры, горбылей, реек, и т.д. С каждым километром пути перевоз этого накладного груза увеличивает себестоимость древесины на предприятии – потребителе.

Принцип непостоянных лесных терминалов, основанных на использовании мобильного деревообрабатывающего оборудования, заключается в первичной обработке заготовленной древесины, с получением бруса, коэффициент полндревесности воза которого приближается к 100%. В дальнейшем полученный при помощи мобильных лесопильных станков брус, при необходимости (например, в теплый период года), может быть обработан антисептиком, а затем вывезен на специализированные лесопильные предприятия для финишной переработки в качественные пиломатериалы.

При этом на лесной терминал можно поставлять не только круглые лесоматериалы (хлысты, сортименты), но и кроновую часть (обладающую минимальным коэффициентом полндревесности) для переработки в мобильных экстрактивных установках с получением достаточно востребованных биологически-активных веществ [26].

Из полученных при первичной обработке древесины на лесном терминале можно получать не только тепловую (электрическую) энергию, но и готовую продукцию, в виде прессованного биотоплива, например, при помощи мобильных грануляторов [27].

Лесной терминал может быть совмещен с вахтовым поселком для лесозаготовительного персонала. Принцип размещения лесного терминала в осваиваемой арендной базе представлен на рисунке 3.

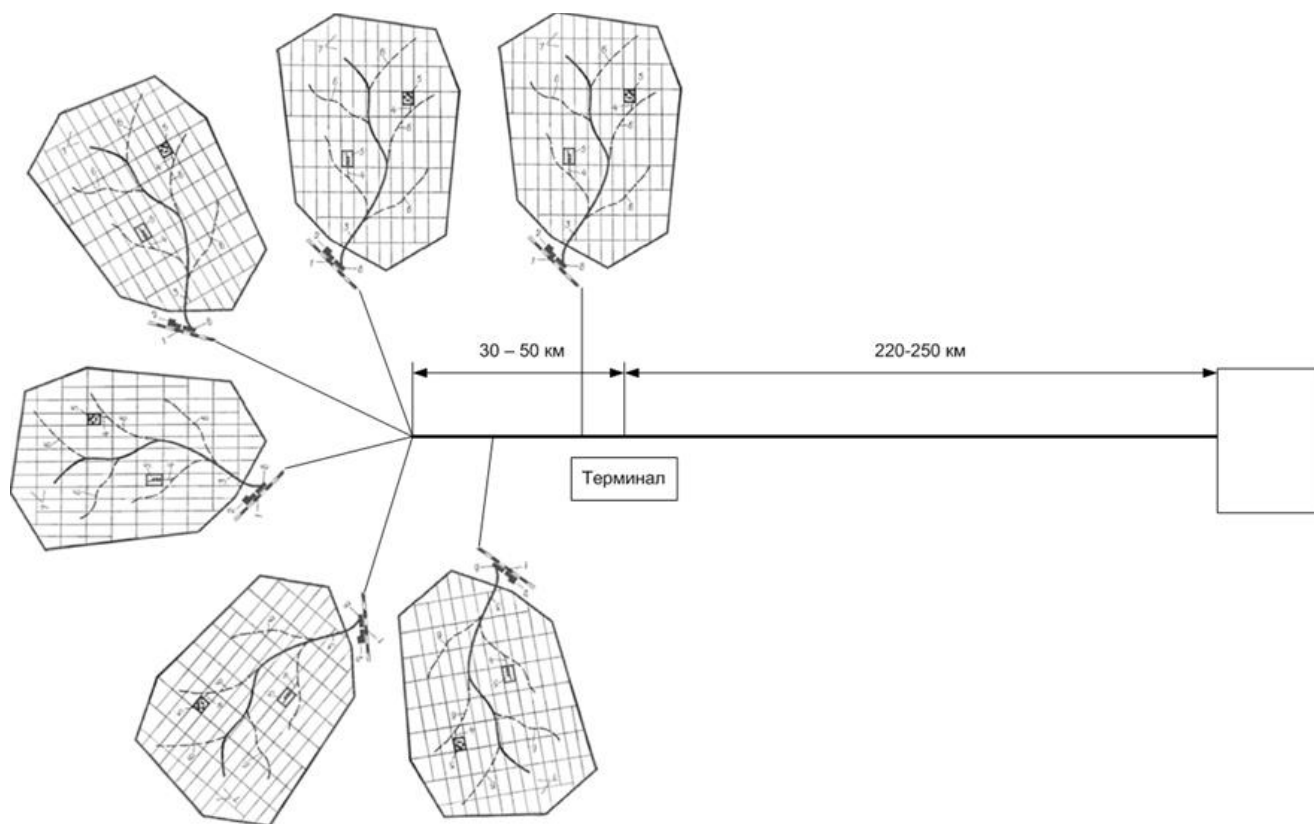


Рис. 3. Принцип размещения временного лесного терминала в осваиваемой арендной базе

При распиловке до 50 м^3 в смену лесной термина достаточно оснастить однопильным станком позиционно-проходного типа, энергопотребление которого составляет около 37 кВт. При распиловке $80\text{--}210 \text{ м}^3$ в смену лесной терминал оптимально оснастить мобильной линией проходного типа, со скоростями подачи до 30 м/мин. Энергопотребление такой линии составляет около 340 кВт. При распиловке 300 м^3 в смену лесной терминал оптимально оснастить мобильной линией проходного типа, со скоростями подачи до 50 м/мин. Энергопотребление такой линии составляет около 750 кВт.

Известно, что чем масштабнее производство, тем, при прочих равных условиях, дешевле единица продукции, или услуги. Крупные лесопромышленные компании, называемые также комплексными лесопромышленными предприятиями, могут расширять свой бизнес, в том числе, за счет выполнения работ на аутсорсинге по компенсационному лесовосстановлению, причем по его полному циклу, или за счет расчистки вновь вводимых в целевую эксплуатацию заброшенных земель сельскохозяйственного

назначения, заросших древесно-кустарниковой растительностью. Поскольку все необходимое для выполнения таких работ оборудование, а также подготовленный персонал у таких предприятий есть.

Необходимо также отметить, что помимо очевидных экономических выгод от работы комплексных лесопромышленных предприятий, объединяющих в себе подразделения (участки, дивизионы) по заготовке, переработке и восстановлению лесных ресурсов, есть и очевидные экологические достоинства. Например, с точки зрения самого большого субъекта Российской Федерации, обладающего наибольшими площадями лесного фонда и очень значительными запасами лесных ресурсов – Республики Саха (Якутия), развитие лесного комплекса позволяет повысить уровень жизни населения, как с экономической, так и с экологической точек зрения.

Даже во времена СССР леса Якутии осваивались крайне недостаточно, с точки зрения их возможностей для республики и страны. После развала СССР более 90% лесопромышленных предприятий прекратили свое существование, люди лишились рабочих мест, а леса – рачительного хозяина.

В настоящее время в Якутии планируется реализация нескольких крупных инвестиционных проектов в области освоения лесов, которые способны дать несколько тысяч новых рабочих мест, и принести в бюджет очень солидные отчисления.

В Якутии около 50 % лесов относится к резервным, в которых никаких хозяйственных мероприятий не проводится. В результате накоплен очень большой запас перестойных лесов, которые теряют свои средообразующие функции.

Очевидно, что вовлечение в промышленную переработку древесины в возрасте спелости является полезным для экологии, снижения лесопожарной обстановки и позволит создать новые рабочие места.

С учетом транспортной удаленности региона, заготовка и реализация круглых лесоматериалов в промышленных объемах может быть целесообразна, в сложившихся экономических условиях, только в западной части региона - районах Витима, Ленска и Олекминска, которые могут рассматриваться как поставщики сырья для развитой лесопильной промышленности Иркутской области. Однако, заготовка круглых лесоматериалов характеризуется низкой добавочной стоимостью, что требует создания деревообрабатывающих производств, которые должны выпускать пиломатериалы, фанеру и клееную древесину, рынками сбыта которых будет являться Республики Саха (Якутия), в которой указанных материалы находятся в дефиците, а их стоимость превышает среднерыночную по России в 1,5-2 раза, что сдерживает возможность развития мебельной промышленности и отрасли деревянного домостроения.

С учетом сезонности заготовки и вывозки круглых лесоматериалов, которые преимущественно осуществляются с марта по октябрь, с перерывами на сезонное закрытие дорог - в условиях Республики Саха (Якутия) возможно несколько сценариев развития промышленности в области лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств к основным из которых следует отнести следующие:

- вахтовая заготовка круглых лесоматериалов лесозаготовительными предприятиями с помощью машинных комплексов для реализации круглых лесоматериалов в другие регионы (низкая рентабельность);

- создание в районах Витима, Ленска и Олекминска крупных технологически интегрированных лесозаготовительно-деревообрабатывающих предприятий большой единичной мощности. При создании подобных комплексов полного цикла возможно существенное снижение себестоимости пиломатериалов, организация котельных в лесных условиях, вырабатывающих электрическую и тепловую энергию из отходов лесозаготовки и деревообработки, способных поставлять на рынок Иркутска излишки круглых лесоматериалов, а внутри Республики Саха (Якутия) обеспечивающих реализацию пиломатериалов, являющихся сырьем для деревообрабатывающих предприятий по меньшей стоимости, что позволит развиваться сфере малого предпринимательства. При увеличении объемов внутреннего потребления древесины будет снижаться доля внешних поставок круглых лесоматериалов, которые будут распиливаться на пиломатериалы и поставляться внутри региона;

- создание технологически интегрированных лесозаготовительно-деревообрабатывающих предприятий, работники которых в летнее время задействованы на заготовке древесины с помощью машинных комплексов или бензиномоторного инструмента, а в период остановки лесозаготовительного производства вследствие погодных условий, осуществляют распиловку заготовленной древесины и выпуск продукции глубокой переработки древесины в лесопильно-деревообрабатывающих цехах с предварительным прогревом древесины до температуры не ниже -28°C. Продукцией таких предприятий может быть мебель, стандартные детали для деревянных домов заводского изготовления, а также столярно-строительные изделия, реализуемые в период развития строительства.

Создание отдельных лесопильных и деревообрабатывающих производств является нецелесообразным, поскольку за счет перепродажи древесины между разными хозяйствующими субъектами, стоимость сырья будет увеличиваться, снижая общую рентабельность отрасли. В случае работы в виде единого комплекса такие предприятия могут реализовывать сырье внутри группы по «трансферной» стоимости, а сами подобные предприятия могут получить государственную поддержку и будут иметь право на включение в список приоритетных инвестиционных проектов.

Вывод

Технологическая интеграция лесопромышленных предприятий в рамках вертикально-интегрированных структур (холдингов, комплексных лесопромышленных предприятий) позволяет успешно решать проблемы повышения конкурентоспособности отечественного лесного комплекса, диверсифицировать производство и продукцию, обновлять машинный парк и модернизировать технологические процессы.

Литература

1. Куницкая О.А. Сквозные процессы лесозаготовительного производства для лесопромышленных холдингов, включающих мачтопропиточные заводы // Вестник Московского государственного университета леса Лесной вестник, № 1 (93), 2013. С. 81-85.
2. Григорьев И.В., Куницкая О.А. Перспективные направления опытно-конструкторских работ в лесном машиностроении // Повышение эффективности лесного комплекса. Материалы третьей Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2017. С. 53-56.
3. Куницкая О.А., Тихонов И.И., Куницкая Д.Е., Григорьев И.В., Земцовский А.Е. Оптимизация процесса раскряжевки хлыстов на лесоперевалочных базах лесных холдингов при выпиловке сырья для мачтопропиточных заводов // ИВУЗ Лесной журнал, 2014. № 3. С. 86-93.
4. Григорьева О.И. Концепции интенсивного использования и воспроизводства лесов // Леса России в XXI веке: сборник научных трудов по итогам международной научно-технической интернет-конференции. 2015. С. 103-107.
5. Морковина С.С., Торжков И.О. Механизмы диверсификации в лесном комплексе // Лесотехнический журнал. 2017. Т. 7. № 3 (27). С. 253-264.
6. Куницкая О.А. Национальный лесной форум продолжает путь // Леспротинформ. - 2019. -№ 4 (142). - С. 174-177.
7. Григорьев И.В., Григорьева О.И. Цыгарова М.В. Вахтовые лесозаготовки. Теория и практика // Леспротинформ. 2016. № 1. - С. 60-65.
8. Гринько О.И., Григорьева О.И., Григорьев М.Ф., Степанова Д.И. Естественное лесовосстановление лиственницы после низовых пожаров // Актуальные проблемы развития лесного комплекса. Материалы XVII Международной научно-технической конференции. Ответственный редактор Ю.М. Авдеев. 2019. С. 26-29.
9. Беляева Н.В., Григорьева О.И., Ароян К.А. Возобновление ели под пологом древостоя в условиях Ленинградской области // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 6 (17). С. 123-130.
10. Kunickaya O., Tanyukevich V.V., Khmeleva D.V., Kulik A., Runova E.M., Savchenkova V., Voronova A.M., Lavrov M.F. Cultivation of the targeted forest plantations // Journal of Environmental Treatment Techniques. 2020. Т. 8. № 4. С. 1385-1393.
11. Давтян А.Б., Куницкая О.А., Григорьев М.Ф., Степанова Д.И., Григорьева А.И. Основы повышения эффективности систем машин для создания и эксплуатации лесных плантаций // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2020. № 56. С. 19-22.
12. Давтян А.Б., Куницкая О.А., Григорьев М.Ф., Степанова Д.И. Оценка эффективности создания и эксплуатации энергетических лесных плантаций // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе. Материалы международной научно-практической конференции. 2019. С. 61-65.
13. Григорьева О.И., Нгуен Ф.З. Лесные плантации для сырьевого обеспечения деревоперерабатывающих предприятий // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы третьей Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2017. С. 59-61.

14. Нгуен Ф.З., Григорьева О.И. Лесные плантации в лесопромышленном производстве Республики Вьетнам // Повышение эффективности использования и воспроизводства природных ресурсов: Материалы научно-практической конференции. 2016. С. 48-51.

15. Григорьев В.И. Лесные плантации в Азиатско-Тихоокеанском регионе // Наука и инновации: векторы развития: Материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых. Сборник научных статей. В 2-х книгах. 2018. С. 75-78.

16. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Вернер Н.Н. Системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2017. Т. 5. № 5 (31). С. 438-443.

17. Воронов Р.В., Марков О.Б., Григорьев И.В., Давтян А.Б. Математическая модель модульного принципа подбора системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019. № 5 (371). С. 125-134.

18. Куницкая О.А., Пудова Т.М., Никитина Е.И. Перспективные направления переработки низкотоварной древесины и древесных отходов в Республике Саха (Якутия) // Потенциал науки и образования: современные исследования в области агрономии, землеустройства, лесного хозяйства. 2019. С. 14-18.

19. Kunitskaya O.A., Shadrin A.A., Kremleva L.V., Mueller O.D., Ivanov V.A., Bederdinova O.I., Kruchinin I.N., Burgonutdinov A.M., Zakharova O.I., Struchkov N.A. Modeling of the processes of the modification of the current volume warming by drainage and pressing // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2019. Т. 25. № S2. С. 167-177.

20. Kunitskaya O.A., Shadrin A.A., Burmistrova O.N., Markov O.B., Gasparyan G.D., Davtyan A.B., Lapshina M.L., Sleptsova N.A., Ustinova V.V., Kruzhilin S.N. Wood treatment with hydro impact: a theoretical and experimental study // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2019. Т. 25. № S2. С. 158-166.

21. Куницкая О.А. Обоснование направлений диверсификации обработки низкотоварной древесины на комплексных лесопромышленных предприятиях с использованием инновационных технологий. СПб.: СПбГЛТУ, 2015. – 250 с.

22. Власов Ю.Н., Куницкая О.А., Григорьев М.Ф., Степанова Д.И., Григорьева А.И. Экспериментальные исследования энергоемкости прессования коро-древесных отходов // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2020. № 57. С. 25-28.

Куницкая О.А. Оценка экономики производства древесных пеллет в России // Потенциал науки и образования: современные исследования в области агрономии, землеустройства, лесного хозяйства. 2019. С. 27-32.

23. Куницкая О.А. Технологические аспекты обработки древесины для получения копильного дыма, используемого в пищевой промышленности // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. 2017. № 6 (47). С. 15-20.

24. Куницкая О.А. Повышение эффективности лесной промышленности Республики Саха (Якутия) путем развития лесохимических технологий // Повышение эффективности лесного комплекса. Материалы Шестой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием. Петрозаводск, 2020. С. 88-89.

25. Куницкая О.А. Перспективы использования мобильных лесохимических установок на верхних складах // Повышение эффективности лесного комплекса. Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2018. С. 85-86.

26. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Никифорова А.И., Глуховский В.М. Перспективные направления развития технологических процессов лесосечных работ // Труды БГТУ. №2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2016. № 2 (184). С. 109-116.

© **Тамби А.А.** – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии и оборудования лесного комплекса, ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет» (ФГБОУ ВО «АГАТУ»), e-mail: a_tambi@mail.ru; **Григорьев И.В.** – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии и оборудования лесного комплекса, ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет» (ФГБОУ ВО «АГАТУ»), e-mail: silver73@inbox.ru; **Давтян А.Б.** – аспирант ФГБОУ ВО «Братский государственный университет» (ФГБОУ ВО «БГУ»), e-mail: armen_davtyan_2019@inbox.ru; **Помигуев А.В.** – преподаватель кафедры тактики и общевоеенных дисциплин, Филиал ФГКВУ ВО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», e-mail: Pomiguyev.IAS@yandex; **Калита О.Н.** – старший преподаватель кафедры технологии лесопользования и

ландшафтного строительства, ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ТГУ»), e-mail: o.n.kalita@mail.ru; **Григорьев В.И.** – студент кафедры региональной экономики и природопользования, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный экономический университет» (ФГБОУ ВО «СПбГЭУ»), e-mail: vmomr@mail.ru.

UDC 630*232

TECHNOLOGICAL INTEGRATION OF TIMBER ENTERPRISES

A.A. Tambi, I.V. Grigoriev, A.B. Davtyan, A.V. Pomiguyev, O.N. Kalita, V.I. Grigoriev

The history of the national forest complex over the past 100 years is characterized by positive dynamics until 1990, followed by a prolonged decline until about 2010, and another rise, which is observed at the present time. The positive dynamics of the development of the forest complex, both in the XX and in the XIX century, is associated with the consolidation of timber industry enterprises, often associated with the diversification of production and products, reducing the cost of work. The period of decline of the Russian forest sector is characterized by the disintegration of a large lumber industry, mass bankruptcy breakaway from them the components, the decline of the adjacent (serving) of production, loss of jobs, lower standard of living in the settlements associated with the forest industry and increasing technological gap, leading to decreased quality and increased cost of products. New technical and technological solutions developed in recent years for harvesting of forest resources, woodworking, reforestation, as well as new types of products produced on the basis of wood can significantly increase the efficiency of forest industry enterprises. But for technical and technological modernization, quite significant capital investments are required, which are only possible for large enterprises with a large volume of harvesting and processing of wood and other forest resources. This aspect is one of the reasons for the currently observed horizontal and vertical integration of Russian forestry enterprises. The article considers the prerequisites and advantages of integration of logging and woodworking enterprises, the prospects for further development of integration processes in the forest industry.

Key words: logging, woodworking, reforestation, forest plantations, integration of timber industry enterprises.

References

1. Kunitskaya O. A. [End-to-end processes of logging production for timber industry holdings, including mastopropitochnye plants] // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa Lesnoy vestnik, No. 1 (93), 2013. pp. 81-85. (InRuss.).
2. Grigorev I. V., Kunitskaya O. A. Perspektivnye napravleniya opytno-dizaynerskikh rabot v lesnom mashinostroyeni [Perspective directions of experimental design works in forest engineering]. Materials of the third All-Russian scientific and practical conference with international participation. 2017. pp. 53-56. (InRuss.).
3. Kunitskaya O. A., Tikhonov I. I., Kunitsky D. E., Grigorev I. V., Zemcovskiy A. E. Optimization of the process of bucking Khlystov on lesoperevalochnaya bases of forest holdings during the sawing of raw materials for mastopropitochny plants // IVUZ magazine, 2014. No. 3. P. 86-93. (InRuss.).
4. Grigoreva O. I. [The concept of intensive use and reproduction of forests] // Forests of Russia in XXI century: collection of scientific papers on the results of international scientific and technical Internet-conference. 2015. pp. 103-107. (InRuss.).
5. Morkovina S. S., Torzhkov I. O. [Mechanisms of diversification in the forest complex]. – 2017. – Vol. 7. – No. 3 (27). – pp. 253-264. (InRuss.).
6. Kunitskaya O. A. [National Forest Forum continues the path] // Lesprominform. – 2019. – № 4 (142). – pp. 174-177. (InRuss.).
7. Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Tsygarova M. V. Shift logging. Theory and practice // Lesprominform. 2016. No. 1. - pp. 60-65. (InRuss.).
8. Grinko O. I., Grigoreva O. I., Grigorev M. F., Stepanova D. I. [Natural reforestation of larch after grass-roots fires] // Actual problems of development of the forest complex. Materials of the XVII International Scientific and Technical Conference. Responsible editor Yu. M. Avdeev. 2019. pp. 26 -29. (InRuss.).
9. Belyaeva N. V., Grigoreva O. I., Aroyan K. A. [Renewal of spruce under the canopy of the forest stand in the conditions of the Leningrad region] // Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2015. Vol. 3. No. 6 (17). pp. 123-130. (InRuss.).

10. Kunickaya O., Tanyukevich V.V., Khmeleva D.V., Kulik A., Runova E.M., Savchenkova V., Voronova A.M., Lavrov M.F. [Cultivation of the targeted forest plantations] // *Journal of Environmental Treatment Techniques*. 2020. Vol. 8. No. 4. pp. 1385-1393.
11. Davtyan A. B., Kunitskaya O. A., Grigoriev M. F., Stepanova D. I., Grigoreva A. I. [Fundamentals of improving the efficiency of machine systems for creating and operating forest plantations] // *Actual problems of the forest complex*. 2020. No. 56. pp. 19-22. (InRuss.).
12. Davtyan A. B., Kunitskaya O. A., Grigorev M. F., Stepanova D. I. [Evaluation of the efficiency of creation and operation of energy forest plantations] // *Energy efficiency and energy saving in modern production and society. Materials of the international scientific and practical conference*. 2019. pp. 61-65. (InRuss.).
13. Grigoreva O. I., Nguyen F. Z. [Forest plantations for raw material support of wood processing enterprises] // *Improving the efficiency of the forest complex: Materials of the third All-Russian scientific and practical conference with international participation*. 2017. pp. 59-61. (InRuss.).
14. Nguyen F. Z., Grigoreva O. I. [Forest plantations in the forest industry production of the Republic of Vietnam] // *Improving the efficiency of use and reproduction of natural resources: Materials of the scientific and practical conference*. 2016. pp. 48-51. (InRuss.).
15. Grigorev V. I. Forest plantations in the Asia-Pacific region [Science and innovation: vectors of development: Materials of the International scientific and practical conference of young scientists]. Collection of scientific articles. In 2 books. 2018. pp. 75-78. (InRuss.).
16. Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Werner N. N. [The machinery for the creation and operation of forest plantations] // *Actual directions of scientific researches of the XXI century: theory and practice*. 2017. Vol. 5. No. 5 (31). pp. 438-443. (InRuss.).
17. Voronov R. V., Markov O. B., Grigorev I. V., Davtyan A. B. Mathematical model of the modular principle of selecting a system of machines for the creation and operation of forest plantations // *News of higher educational institutions. Forest magazine*. 2019. No. 5 (371). pp. 125-134. (InRuss.).
18. Kunitskaya O. A., Pudova T. M., Nikitina E. I. Perspective directions of processing of low-commodity wood and wood waste in the Republic of Sakha (Yakutia) // *Potential of science and education: modern research in the field of agronomy, land management, forestry*. 2019. P. 14 -18. (InRuss.).
19. Kunitskaya O.A., Shadrin A.A., Kremleva L.V., Mueller O.D., Ivanov V.A., Bederdinova O.I., Kruchinin I.N., Burgonutdinov A.M., Zakharova O.I., Struchkov N.A. Modeling of the processes of the modification of the current volume warming by drainage and pressing // *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2019. Vol. 25. No. S2. pp. 167-177.
20. Kunitskaya O.A., Shadrin A.A., Burmistrova O.N., Markov O.B., Gasparyan G.D., Davtyan A.B., Lapshina M.L., Sleptsova N.A., Ustinova V.V., Kruzhilin S.N. [Wood treatment with hydro impact: a theoretical and experimental study // *Bulgarian Journal of Agricultural Science*]. 2019. Vol. 25. no. S2. pp. 158-166.
21. Kunitskaya O. A. [Justification of the directions of diversification of low-commodity wood processing at complex timber enterprises using innovative technologies]. St. Petersburg: SPbFTU, 2015. - 250 p. (InRuss.).
22. Vlasov Yu. N., Kunitskaya O. A., Grigorev M. F., Stepanova D. I., Grigoreva A. I. [Experimental studies of the energy intensity of pressing bark-wood waste]. – 2020. – No. 57. - pp. 25-28. (InRuss.).
23. Kunitskaya O. A. Assessment of the economy of wood pellet production in Russia // *Potential of science and education: modern research in the field of agronomy, land management, forestry*. 2019. pp. 27-32. (InRuss.).
24. Kunitskaya O. A. Technological aspects of wood processing for obtaining smoky smoke used in the food industry // *Technology and commodity science of innovative food products*. 2017. No. 6 (47). pp. 15-20. (InRuss.).
25. Kunitskaya O. A. Improving the efficiency of the forest industry of the Republic of Sakha (Yakutia) by developing forest chemical technologies. Materials of the Sixth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation. Petrozavodsk, 2020. pp. 88-89. (InRuss.).
26. Kunitskaya O. A. Prospects for the use of mobile forest chemical plants in upper warehouses // *Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation*. 2018. Pp. 85-86. (InRuss.).
27. Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Nikiforova A. I., Glukhovskiy V. M. Perspective directions of development of technological processes of logging operations. No. 2. Forestry and woodworking industry. 2016. No. 2 (184). pp. 109-116. (InRuss.).

Grigoriev I.V. – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of Technology and equipment of the forest complex, Arctic State Agrotechnological University (ASATU), e-mail: silver73@inbox.ru; **Davtyan A.B.** – Post-graduate student at the Bratsk State University (BSU), e-mail: armen_davtyan_2019@inbox.ru; **Pomiguyev A.V.** – Senior Lecturer of the 1st Department of Tactics and General Military Disciplines, branch of the Federal State Military Educational Institution of Higher Education "Military Training and Research Center of the Air Force" Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin" in Syzran, e-mail: Pomiguyev.IAS@yandex; **Kalita O.N.** – Senior Lecturer of the Department of Forest management and landscape construction technologies, Pacific State University (PSU)), e-mail: o.n.kalita@mail.ru; **Grigoriev V.I.** – student of the Department of Regional Economics and Environmental Management, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "St. Petersburg State University of Economics", e-mail: vmomr@mail.ru.

УДК 621.1

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ МЕХАНИЗМА ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА ТИПА «АЛЬФА» ДЛЯ АДАПТАЦИИ К ПРИМЕНЕНИЮ В ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ

Е.А. Тихонов, О.А. Куницкая, В.В. Швецова, Г.А. Калита, Н.Л. Фам

В данной статье рассматривается многокритериальная параметризация кривошипно-ползунной группы двигателя Стирлинга типа «Альфа». Многокритериальность подразумевает введение в уравнения различных длин шатунов поршня и вытеснителя, варьируемый угол между осями цилиндров, а также перекрещивающиеся оси цилиндров и коленчатого вала. Получены зависимости перемещений поршня и вытеснителя с учетом ряда варьируемых геометрических параметров. Определены граничные условия отношений длин шатунов поршня и вытеснителя с учетом смещения осей цилиндров в плоскости, перпендикулярной оси коленчатого вала. Полученное уравнение перемещения поршня от перемещения вытеснителя имеет в своем составе угол поворота коленчатого вала, что позволит получить численную модель без моделирования кривошипа и шатунов, что значительно снизит ресурсоемкость численных расчетов. Получена зависимость крутящего момента на коленчатом валу при известных давлениях на поршень и вытеснитель при свободной компоновке кривошипно-ползунного механизма двигателя Стирлинга типа «Альфа». Данное исследование, в конечном итоге, позволит определять оптимальные параметры проектируемого двигателя Стирлинга в зависимости от мощности и рабочих температур. Это позволит спроектировать двигатель для использования в лесопромышленном комплексе. Подразумевается использование отходов лесозаготовок и деревообработки как топлива для электрогенератора на базе двигателя Стирлинга. Данные виды топлива обладают определенной температурой горения и удельной теплотой сгорания. Их эффективное использование для получения энергии является актуальной задачей лесного комплекса в настоящее время. Полученное уравнение крутящего момента позволит исследовать рабочий процесс двигателя при решении газодинамической задачи циклического перетекания газа («рабочего тела») из полости цилиндра поршня в полость цилиндра вытеснителя и обратно.

Ключевые слова: Стирлинг, тип «Альфа», перемещение поршня и вытеснителя, крутящий момент, параметризация.

Введение

В настоящее время, интерес к двигателям внешнего сгорания вновь возрастает. Причиной тому является то, что углеводородное топливо не является неистощимым ресурсом. Цена традиционных энергоносителей растет. Но, при этом, все больше встает вопрос получения электроэнергии.

Особенно это актуально для удаленных районов с мало развитой инфраструктурой. Сейчас вопрос их энергоснабжения, как правило решается за счет дизель-генераторов. Такое решение дорого как само по себе (на 1 кВт·час сжигается 0,2 кг дизельного топлива [0]), так и с учетом стоимости доставки топлива.

При этом, в отдаленных районах бывает много других типов энергоресурсов. Уголь, дрова, торф, отходы сельскохозяйственного производства, и т.д. – данные ресурсы подойдут как источник энергии для двигателя, работающего по принципу Стирлинга.

Двигатели Стирлинга (далее – ДС) известны давно [0], их разработка и совершенствование базировались на основах термодинамики и огромном объеме экспериментальных исследований [0]. Поэтому, данные двигатели не смогли выдержать темпы развития, обладающих отлично разработанной теоретической базой, двигателей внутреннего сгорания.

Исследование процессов, протекающих в ДС ограничено исследованием отдельных элементов и закономерностей. Например шаттл-эффект в системе «вытеснительный поршень-цилиндр» [0], тепловые потоки системы «рабочее тело-регенератор» при изменении направления движения газа, влияние «мертвого объема» на КПД и удельную мощность [0] и т.д.

Комплексное же рассмотрение рабочего процесса ДС и разработка общей теории – остается нерешенной задачей. Для ее решения необходимо применять численные методы решения связанных задач [0]. Под связанными задачами понимаются задачи гидро-газодинамики, теплопередачи, механики деформируемого тела в одной численной модели исследуемого механизма [0].

При правильном подходе будет возможно получить оптимальные параметры ДС и получить эффективную энергетическую машину, реализующую цикл Стирлинга без решения таких задач как, например, герметизация рабочего тела [0].

Силовая параметризация кривошипно-ползунной группы двигателя Стирлинга типа «Альфа» рассмотрена в [9], а кинематическая параметризация кривошипно-ползунной группы двигателя Стирлинга типа «альфа», с определением расчетных схем взаимного расположения элементов двигателя и величины крутящего момента в зависимости от угла поворота коленчатого вала, рассмотрена в [10].

Получение зависимости перемещений поршня и вытеснителя с учетом ряда варьируемых геометрических параметров, и определение граничных условий отношений длин шатунов поршня и вытеснителя с учетом смещения осей цилиндров в плоскости, перпендикулярной оси коленчатого вала является актуальной задачей повышения эффективности эксплуатации таких двигателей в конкретных условиях эксплуатации.

Задачей теоретического исследования данной статьи является определение кинематической зависимости взаимного расположения поршня и вытеснителя ДС типа «Альфа» при различных значениях геометрических параметров и определение зависимости крутящего момента на коленчатом валу от угла поворота и давления на поршень и вытеснитель. Данные уравнения позволят исследовать рабочий процесс двигателя при решении газодинамической задачи циклического перетекания газа из полости поршня в полость вытеснителя и обратно. Схема двигателя представлена на рис. 1.

Постановка первой задачи следующая: перемещение вертикального поршня (Y) задается гармонической функцией. Так как на данном этапе исследуется исключительно газодинамическая задача, то в моделировании механической части не необходимости. Далее, необходимо вывести зависимость положения вытеснителя от положения поршня $X(Y)$, что позволит в дальнейшем исследовать взаимное изменение объемов горячей и холодной полостей и динамику перетекания газа. При этом, необходимо учесть возможность изменения угла между осями цилиндров (рис. 1). Также, необходимо предусмотреть смещение осей цилиндров.

Постановка второй части задачи следующая: положение коленчатого вала будет определяться углом β . Давление «рабочего тела» в системе будет определяться силами, действующими на поршень и вытеснитель. Необходимо определить функцию крутящего момента от угла β в зависимости от геометрических параметров кривошипно-ползунной группы. Взаимные ограничения геометрических параметров кривошипно-ползунной группы определены в [9].

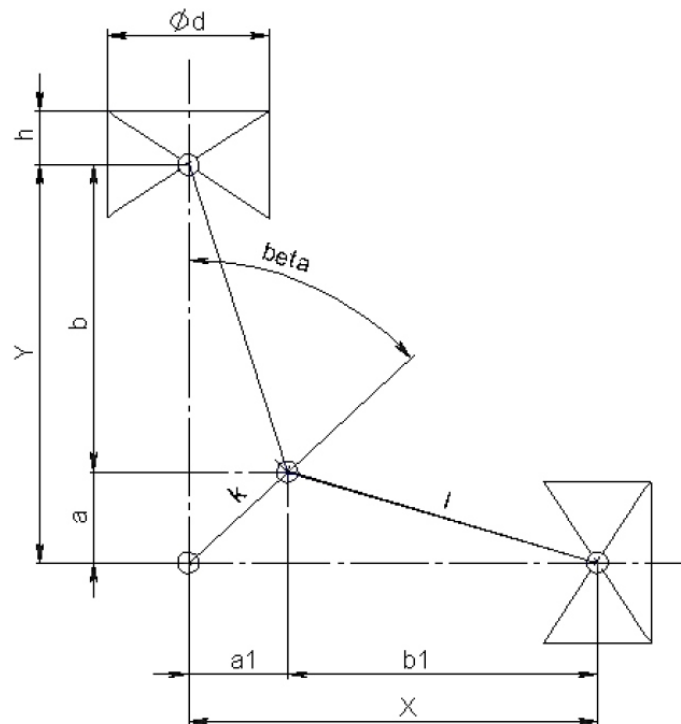


Рис. 1. Схема двигателя Стирлинга типа «Альфа»

Результаты исследования

Как видно из рис. 1, угол между осями поршней составляет 90° . Данный параметр считается оптимальными для получения максимальной удельной мощности. Система уравнений координат перемещений вертикального и горизонтального поршней в зависимости от угла поворота коленчатого вала будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} Y = k \cdot \cos \beta + \sqrt{l^2 - (k \cdot \sin \beta)^2} \\ X = k \cdot \sin \beta + \sqrt{l^2 - (k \cdot \cos \beta)^2} \end{cases} \quad (1)$$

Далее, необходимо определить вид уравнения $X(Y)$ - ?. Для этого определим координату горизонтального поршня X в виде (см. рис. 1):

$$X = \sqrt{k^2 - (Y - b)^2} + \sqrt{l^2 - (Y - b)^2}. \quad (2)$$

Далее, рассмотрим параметр b . Данный параметр может быть определен следующим образом:

$$\begin{cases} b = Y - a \\ b = \sqrt{l^2 - a_1^2} \end{cases} \quad (3)$$

Учитывая, что:

$$a_1^2 = k^2 - a^2, \quad (4)$$

и 2-е уравнение системы (4) получим следующее:

$$b = \sqrt{l^2 - (k^2 - a^2)} = \sqrt{l^2 + k^2 + a^2}, \quad (5)$$

Учитывая 1 уравнение системы (4) получаем:

$$b = \sqrt{l^2 + k^2 + (Y - b)^2} = \sqrt{l^2 + k^2 + Y^2 - 2Yb + b^2}. \quad (6)$$

Возведем полученное уравнение в квадрат и выразим b :

$$b = \frac{l^2 + k^2 + Y^2}{2Y}. \quad (7)$$

Подставим полученное выражение в уравнение (2):

$$X = \sqrt{k^2 - \left(Y - \frac{l^2 + k^2 + Y^2}{2Y}\right)^2} + \sqrt{l^2 - \left(Y - \frac{l^2 + k^2 + Y^2}{2Y}\right)^2}. \quad (8)$$

Рассмотрим вычитаемое подкоренной разности. Упростим его:

$$Y - \frac{l^2 + k^2 + Y^2}{2Y} = Y - \left(\frac{l^2 + k^2}{2Y} + \frac{Y^2}{2Y} \right) = Y - \frac{l^2 + k^2}{2Y} - \frac{Y}{2} = \frac{Y}{2} - \frac{l^2 + k^2}{2Y}. \quad (9)$$

Окончательно имеем вид уравнения, описывающего взаимосвязь координаты горизонтального поршня относительно координаты вертикального:

$$X(Y) = \sqrt{k^2 - \left(\frac{Y}{2} - \frac{l^2 + k^2}{2Y} \right)^2} + \sqrt{l^2 - \left(\frac{Y}{2} - \frac{l^2 + k^2}{2Y} \right)^2}. \quad (10)$$

Теперь необходимо убрать ограничения данной модели: одинаковые длины шатунов, угол между осями цилиндров равный 90° , отсутствие смещения осей цилиндров в плоскости, перпендикулярной оси вращения коленчатого вала. Введем отдельные переменные для учета длин шатунов поршня и вытеснителя:

$$\begin{cases} Y = k \cdot \cos \beta + \sqrt{L_Y^2 - (k \cdot \sin \beta)^2} \\ X = k \cdot \sin \beta + \sqrt{L_X^2 - (k \cdot \cos \beta)^2} \end{cases} \quad (11)$$

где L_Y и L_X – длины шатунов вытеснителя и поршня, соответственно.

Выполнив преобразования аналогичные вышеизложенным, получим уравнение положения вытеснителя (X) от положения поршня (Y), учитывающее отличающиеся длины шатунов:

$$X(Y) = \sqrt{k^2 - \left(\frac{Y}{2} - \frac{L_Y^2 + k^2}{2Y} \right)^2} + \sqrt{L_X^2 - \left(\frac{Y}{2} - \frac{L_Y^2 + k^2}{2Y} \right)^2}. \quad (12)$$

Далее, учтем возможность изменения угла между осями цилиндров. Схема представлена на рис. 2.

Определим положение поршня (Y) методом поворота осей координат. Тогда, угол поворота коленчатого вала для расчета координаты положения поршня будет определяться суммой угла положения кривошипа от вертикали и угла поворота оси цилиндра поршня от вертикали:

$$\beta' = \beta + \alpha. \quad (13)$$

Тогда, угол между осями цилиндров:

$$\lambda = 90 + \alpha. \quad (14)$$

Преобразуем систему (11):

$$\begin{cases} Y = k \cdot \cos(\beta + \alpha) + \sqrt{L_Y^2 - (k \cdot \sin(\beta + \alpha))^2} \\ X = k \cdot \sin \beta + \sqrt{L_X^2 - (k \cdot \cos \beta)^2} \end{cases}. \quad (15)$$

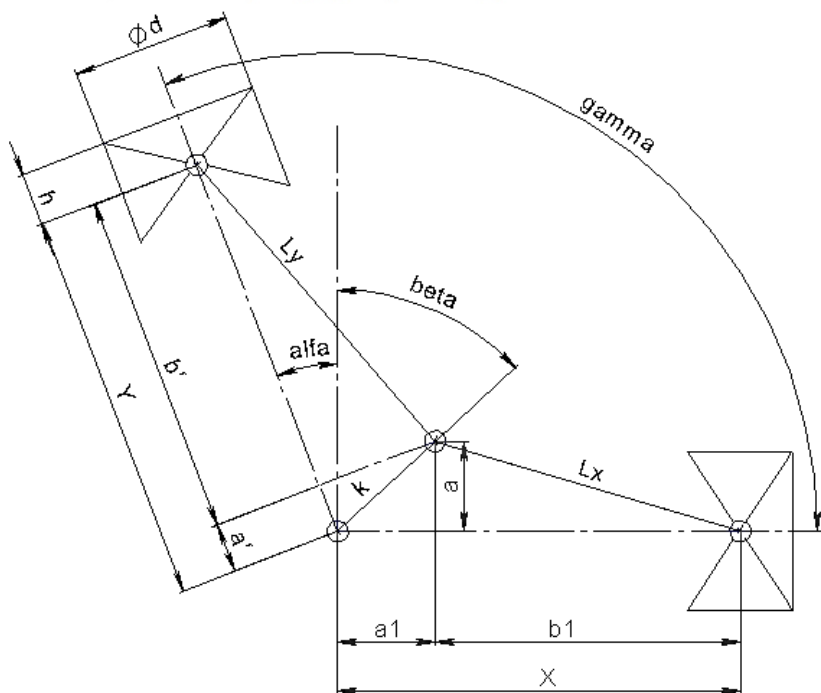


Рис. 2. Схема ДС со свободным углом между осями цилиндров и различными длинами шатунов

Далее, необходимо определить вид уравнения $X(Y)$. Для этого определим координату горизонтального поршня X в виде (рис. 2):

$$X = \sqrt{k^2 - a^2} + \sqrt{L_X^2 - a^2}. \quad (16)$$

При том, учтем следующее:

$$\begin{aligned} a' &= k \cdot \cos(\alpha + \beta) \\ a &= k \cdot \cos(\beta) \\ k &= \frac{a'}{\cos(\alpha + \beta)} = \frac{a}{\cos(\beta)}. \end{aligned} \quad (17)$$

Тогда:

$$a = \frac{a' \cos(\beta)}{\cos(\alpha + \beta)}. \quad (18)$$

При этом, параметр a' будет равен:

$$a' = Y - b'. \quad (19)$$

Таким образом, подставляя (18) и (19) в зависимость (16) получаем:

$$X = \sqrt{k^2 - \left(\frac{(Y - b') \cos(\beta)}{\cos(\alpha + \beta)}\right)^2} + \sqrt{L_X^2 - \left(\frac{(Y - b') \cos(\beta)}{\cos(\alpha + \beta)}\right)^2}. \quad (20)$$

Далее, рассмотрим параметр b' . Данный параметр может быть определен через длину шатуна поршня L_y и угол наклона шатуна поршня к оси перемещения поршня α_y (см. рис. 3):

$$b' = L_y \cos(\alpha_y). \quad (21)$$

При этом:

$$\sin(\alpha_y) = \frac{k'}{L_y} = \frac{k \cdot \sin(\alpha + \beta)}{L_y}. \quad (22)$$

Отсюда:

$$\alpha_y = \arcsin\left(\frac{k \cdot \sin(\alpha + \beta)}{L_y}\right). \quad (22)$$

Подставляя зависимость (22) формулу (21) получим следующее:

$$b' = L_y \cdot \cos\left(\arcsin\left(\frac{k \cdot \sin(\alpha + \beta)}{L_y}\right)\right). \quad (23)$$

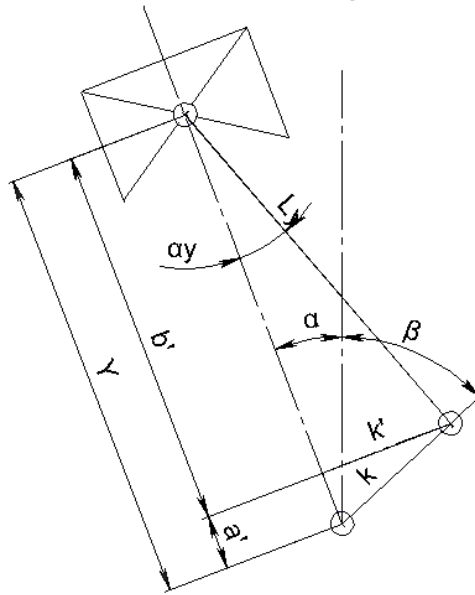


Рис. 3. Схема к определению b'

Подставляя (23) в (20) получаем:

$$\begin{aligned} X &= \sqrt{k^2 - \left(\frac{(Y - L_y \cdot \cos(\arcsin(\frac{k \cdot \sin(\alpha + \beta)}{L_y})) \cos(\beta)}{\cos(\alpha + \beta)}\right)^2} + \\ &+ \sqrt{L_X^2 - \left(\frac{(Y - L_y \cdot \cos(\arcsin(\frac{k \cdot \sin(\alpha + \beta)}{L_y})) \cos(\beta)}{\cos(\alpha + \beta)}\right)^2}. \end{aligned} \quad (24)$$

Таким образом, мы получили зависимость положения вытеснителя от положения поршня.

Подставив первое уравнение системы (15) в (24), окончательно имеем вид уравнения, описывающего взаимосвязь координат поршня и вытеснителя в зависимости от угла поворота коленчатого вала, длин шатунов и вылета шатунной шейки коленчатого вала:

$$X = \sqrt{k^2 - \left(\frac{(k \cdot \cos(\beta + \alpha) + \sqrt{L_y^2 - (k \cdot \sin(\beta + \alpha))^2} - L_y \cdot \cos(\arcsin(\frac{k \cdot \sin(\alpha + \beta)}{L_y})) \cos(\beta)}{\cos(\alpha + \beta)} \right)^2} + \sqrt{L_x^2 - \left(\frac{(k \cdot \cos(\beta + \alpha) + \sqrt{L_y^2 - (k \cdot \sin(\beta + \alpha))^2} - L_y \cdot \cos(\arcsin(\frac{k \cdot \sin(\alpha + \beta)}{L_y})) \cos(\beta)}{\cos(\alpha + \beta)} \right)^2}. \quad (25)$$

Далее, учтем возможность смещения осей цилиндров поршня и вытеснителя от первоначального положения в плоскости, перпендикулярной оси коленчатого вала. Схема к определению представлена на рисунок 4.

С учетом E_y и E_x преобразуем систему уравнений (15):

$$\begin{cases} Y_e = k \cdot \cos(\beta + \alpha) + \sqrt{L_y^2 - (k \cdot \sin(\beta + \alpha) + E_y)^2} \\ X_e = k \cdot \sin \beta + \sqrt{L_x^2 - (k \cdot \cos \beta + E_x)^2} \end{cases}. \quad (26)$$

Таким образом, мы получили расчетную модель ДС подразумевающую возможность изменения следующих параметров: k - вылет шатунной шейки коленчатого вала; L_x - длина шатуна вытеснителя; L_y - длина шатуна поршня; λ - угол между осями цилиндров; E_x - смещение оси вытеснителя; E_y - смещение оси поршня.

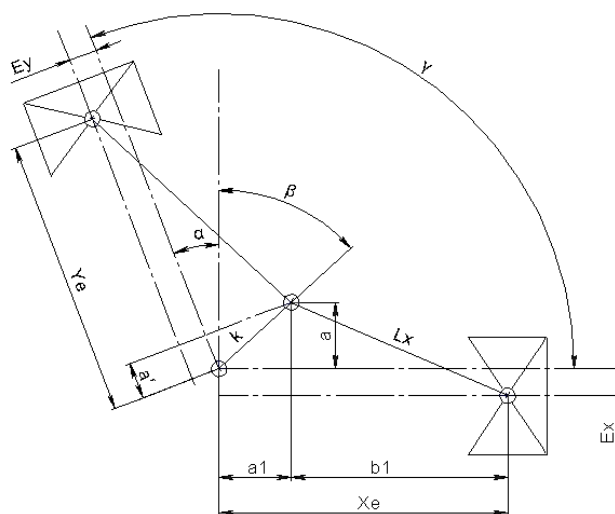


Рис. 4. Схема двигателя ДС со смещением осей цилиндров

Во избежание взаимоисключающих комбинаций приведенных выше параметров, определим диапазоны приемлемых значений. Соотношение длин шатунов должно удовлетворять условию:

$$\frac{L_x}{L_y} < 1. \quad (27)$$

Шатун вытеснителя должен быть длиннее вылета шатунной шейки коленчатого вала:

$$\frac{k}{L_x} < 1. \quad (28)$$

Смещение осей вытеснителя и поршня должны удовлетворять условию:

$$\begin{aligned} |E_y| &< L_y - k \\ |E_x| &< L_x - k. \end{aligned} \quad (29)$$

Далее, рассмотрим схему к определению крутящего момента от усилия на поршне которая представлена на рисунке 5.

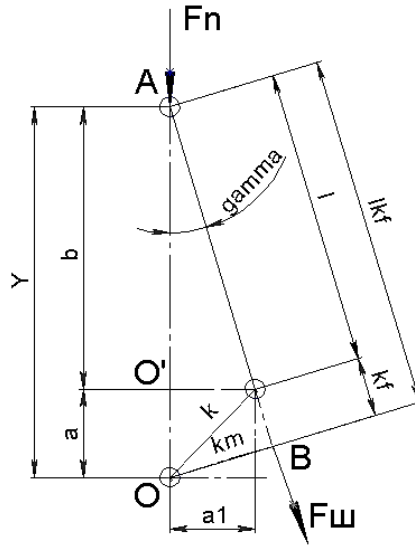


Рис. 5. Схема к определению крутящего момента

Крутящий момент относительно точки О будет определяться по формуле:

$$M = F_{ш} \cdot k_{ш}. \quad (30)$$

где: $F_{ш} = \frac{F_n}{\cos \gamma}$ - сила, действующая вдоль шатуна, Н; $k_{ш} = \sqrt{k^2 - (l_{kf} - l)^2}$ - плечо действия силы, м.

Согласно рис. 5, l_{kf} будет равно:

$$l_{kf} = Y \cdot \cos \gamma = \frac{Y(Y-a)}{l}. \quad (31)$$

Теперь, определим параметр a из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} a_1^2 = l^2 - (Y - a)^2 \\ a_1^2 = k^2 - a^2 \end{cases}. \quad (32)$$

Откуда:

$$l^2 - (Y - a)^2 = k^2 - a^2. \quad (33)$$

Выразим a :

$$a = \frac{k^2 - l^2 + Y^2}{2Y} = \frac{Y}{2} + \frac{k^2 - l^2}{2Y}. \quad (34)$$

Далее, подставим полученное выражение в (31):

$$\begin{aligned} l_{kf} &= \frac{Y(Y-a)}{l} = \frac{Y \left(Y - \left(\frac{Y}{2} + \frac{k^2 - l^2}{2Y} \right) \right)}{l} = \frac{Y \left(Y - \frac{Y}{2} - \frac{k^2 - l^2}{2Y} \right)}{l} = \\ &= \frac{\frac{Y^2}{2} - \frac{Y(k^2 - l^2)}{2Y}}{l} = \frac{\frac{Y^2}{2} + \frac{k^2 - l^2}{2}}{l} = \frac{Y^2 + k^2 - l^2}{2l} = \frac{l(Y^2 + k^2 - l^2)}{2}. \end{aligned} \quad (35)$$

Преобразуем формулу (30) подставив в нее формулы (32), (34), (35):

$$\begin{aligned} M &= F_{ш} \cdot k_{ш} = \frac{F_n}{\cos \gamma} \cdot \sqrt{k^2 - (l_{kf} - l)^2} = \frac{F_n \cdot l}{Y - a} \cdot \sqrt{k^2 - \left(\frac{l(Y^2 + k^2 - l^2)}{2} - l \right)^2} = \\ &= \frac{F_n \cdot l}{Y - \frac{Y}{2} - \frac{k^2 - l^2}{2Y}} \cdot \sqrt{k^2 - \left(\frac{l(Y^2 + k^2 - l^2)}{2} - l \right)^2} = \\ &= \frac{2Y \cdot F_n \cdot l}{Y^2 - k^2 + l^2} \cdot \sqrt{k^2 - \left(\frac{l(Y^2 + k^2 - l^2)}{2} - l \right)^2}. \end{aligned} \quad (36)$$

Окончательно имеем уравнение, описывающее взаимосвязь крутящего момента от силы давления на поршень - F_n , положения поршня - Y , длины шатуна - l и плеча коленвала - k .

Взаимосвязь крутящего момента с углом поворота коленвала, через положение поршня, отразим следующей зависимостью (см. рис. 2):

$$Y = k \cdot \cos(\beta + \alpha) + \sqrt{l^2 - (k \cdot \sin(\beta + \alpha))^2}. \quad (37)$$

Тогда, зависимость для определения крутящего момента от усилия на поршне, при свободном угле между осями цилиндров, будет следующей:

$$M_Y = \frac{2(k \cdot \cos(\beta + \alpha) + \sqrt{l^2 - (k \cdot \sin(\beta + \alpha))^2}) \cdot F_n \cdot l}{(k \cdot \cos(\beta + \alpha) + \sqrt{l^2 - (k \cdot \sin(\beta + \alpha))^2})^2 - k^2 + l^2} \cdot \sqrt{k^2 - \left(\frac{l((k \cdot \cos(\beta + \alpha) + \sqrt{l^2 - (k \cdot \sin(\beta + \alpha))^2})^2 + k^2 - l^2)}{2} - l)^2} \quad (38)$$

Далее, учтем смещение оси цилиндра поршня E_Y . Схема к определению влияния смещения E_Y на крутящий момент представлена на рисунке 6.

Для оценки влияния смещения E_Y применим поворот полярной системы координат на угол $\Delta\beta$ по часовой стрелке. Тогда задача сводится к определению крутящего момента по схеме, показанной на рисунке 6, с той лишь разницей, что угол поворота коленчатого вала будет определяться разностью $(\beta - \Delta\beta)$, а угол отклонения шатуна - $(\gamma + \Delta\beta)$. Следовательно, для определения крутящего момента необходимо определить $\Delta\beta$.

Из треугольника OAA' (рис. 6):

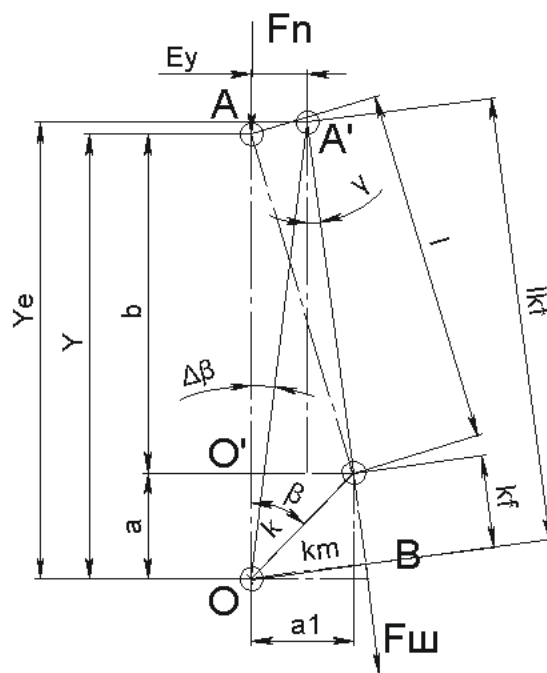


Рис. 6. Схема к определению влияния смещения на крутящий момент

$$\Delta\beta = \arctg\left(\frac{E_Y}{Y_e}\right). \quad (39)$$

Тогда, после преобразования зависимости (38), уравнение для определения крутящего момента от усилия на поршне при смещении оси цилиндра поршня в плоскости, перпендикулярной оси коленчатого вала будет иметь вид:

$$M_Y = \frac{2(k \cdot \cos(\beta - \arctg(\frac{E_Y}{Y_e}) + \alpha) + \sqrt{l^2 - (k \cdot \sin(\beta - \arctg(\frac{E_Y}{Y_e}) + \alpha))^2}) \cdot F_{\Pi} \cdot l}{(k \cdot \cos(\beta - \arctg(\frac{E_Y}{Y_e}) + \alpha) + \sqrt{l^2 - (k \cdot \sin(\beta - \arctg(\frac{E_Y}{Y_e}) + \alpha))^2})^2 - k^2 + l^2} \cdot \sqrt{k^2 - (\frac{l((k \cdot \cos(\beta - \arctg(\frac{E_Y}{Y_e}) + \alpha) + \sqrt{l^2 - (k \cdot \sin(\beta - \arctg(\frac{E_Y}{Y_e}) + \alpha))^2}) + k^2 - l^2)}{2} - l)^2} \quad (39)$$

При работе двигателя Стирлинга типа «Альфа» усилие от динамического давления газов воспринимает также и вытеснитель. Так как вытеснитель тоже соединен с коленчатым валом (см. рис. 1), то от усилия на нем будет возникать крутящий момент на коленчатом валу. Данный момент также будет описываться уравнением (39), но без учета угла α и сменой соответствующих переменных (см. рис. 1):

$$M_X = \frac{2(k \cdot \sin(\beta - \arctg(\frac{E_X}{X_e})) + \sqrt{L_x^2 - (k \cdot \cos(\beta - \arctg(\frac{E_X}{X_e})))^2}) \cdot F_{\Pi} \cdot L_x}{(k \cdot \sin(\beta - \arctg(\frac{E_X}{X_e})) + \sqrt{L_x^2 - (k \cdot \cos(\beta - \arctg(\frac{E_X}{X_e})))^2})^2 - k^2 + L_x^2} \cdot \sqrt{k^2 - (\frac{L_x((k \cdot \sin(\beta - \arctg(\frac{E_X}{X_e})) + \sqrt{L_x^2 - (k \cdot \cos(\beta - \arctg(\frac{E_X}{X_e})))^2}) + k^2 - L_x^2)}{2} - L_x)^2} \quad (40)$$

Тогда, суммарный крутящий момент, действующий на коленчатый вал при свободной компоновке кривошипно-ползунного механизма:

$$M = M_Y + M_X. \quad (41)$$

Обсуждение и заключение

Полученные уравнения: первое уравнение системы (1) и итоговое уравнение позволяют определять положения поршня и вытеснителя при различной длине шатунов и угле между осями цилиндров поршня и шатуна отличающегося от 90°. Это позволит создать численную модель рабочего процесса ДС без моделирования кривошипно-ползунной группы, а моделируя лишь рабочие объемы камер поршня и вытеснителя. Это позволит всесторонне исследовать взаимовлияние конструктивных параметров кривошипно-шатунной группы на рабочие характеристики ДС. При этом будет возможность изменять размеры модели для исследования влияния масштабного эффекта, оказывающего влияние на газодинамические процессы и процессы тепло-массопереноса в рабочем теле. Геометрические ограничения, установленные в модели, позволят определить приемлемые диапазоны изменения параметров для полнофакторного численного исследования рабочего процесса ДС.

Полученные уравнения (39), (40) и итоговое уравнение (41) позволяют определять крутящий момент при различной длине шатунов и угле между осями цилиндров поршня и шатуна отличающегося от 90° и смещения осей цилиндров в плоскости, перпендикулярной оси коленчатого вала.

Данное исследование, в конечном итоге, позволит определять оптимальные параметры проектируемого двигателя Стирлинга в зависимости от мощности и рабочих температур. Это позволит спроектировать двигатель для использования в лесопромышленном комплексе. Подразумевается использование отходов лесозаготовок и деревообработки как топлива для электрогенератора на базе ДС. Данные виды топлива обладают определенной температурой горения и удельной теплотой сгорания [11 - 16] (табл. 1). Их эффективное использование для получения энергии является актуальной задачей лесного комплекса в настоящее время [17-20].

Таблица 1 – Средние температуры горения источников тепла

№	Тип источника	Температура, С°	Удельная теплота сгорания, МДж/кг
1	Опилки нормальной влажности (сосна, береза)	400	8,37
2	Щепа	450	10,93
3	Кора	450	5,69
4	Отходы лесозаготовок	350	8,12

Применение разработанных математических моделей позволит спроектировать ДС под конкретный вид топлива, что позволит получить максимальный КПД.

Также, отдельным направлением внедрения ДС в лесопромышленный комплекс будет разработка двигателя для утилизации тепла из вторичных источников: отработанные газы сушильных камер, котлы системы отопления, системы охлаждения дизельных электростанций. Температура этих источников приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Средние температуры горения источников тепла

№	Тип источника	Температура, С°
1	Отработанные газы сушильных камер	70
2	Котлы системы отопления	800
3	Система охлаждения ДЭС	130

Как видно из таблицы, для утилизации тепла данных источников, потребуется разработка ДС со специфическими параметрами.

В целом, ДС, как привод генератора, эксплуатирующийся в условиях лесозаготовительных предприятий, является перспективным. Внедрение СЭС, работающей на отходах лесозаготовки, вместо ДЭС решит несколько вопросов: подвоз топлива, шумовое загрязнение, загрязнения продуктами горения дизельного топлива, а главное, утилизация отходов лесозаготовки.

Для успешного решения поставленной задачи, необходимо разработать методику разработки и проектирования ДС, адаптированных под соответствующее топливо. Так как при масштабировании ДС кардинально меняются процессы тепломассопереноса, то необходимо исследовать несколько диапазонов мощности для определения оптимальных конструктивных параметров. Для определения границ данных диапазонов необходимо выполнить последовательную, многопараметрическую оптимизацию конструкции с постепенным повышением мощности. Решение данной задачи сопряжено с огромной сложностью изготовления большого количества экспериментальных образцов. На сегодняшний день, эту проблему можно решить, только применяя методы численного моделирования газодинамики и тепловых процессов с кинематической и динамической параметризацией механической части исследуемых конструкций.

Литература

1. Расход дизельного генератора // <http://machineries.ru/> URL: http://machineries.ru/a_19.html (дата обращения: 06.12.2018).
2. Шалай В.В., Макушев Ю.П. Двигатель внешнего сгорания // Омский научный вестник. 2008. № 3. С. 65–71.
3. Корнеев С.А. Двигатель Стирлинга (история, настоящее и перспектива) // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2011. № 2. С. 132–135.
4. Савченко В.А., Столяров С.П. Об интенсификации теплого потока в систему охлаждения от деталей цилиндрической группы двигателя стирлинга вследствие шатл-эффекта // Труды Санкт-Петербургского государственного морского университета. 2014. № 1. С. 31–37.
5. Лукачев С.В., Довгялло А.И., Белозерцев В.Н. Термомеханические преобразователи с сильфонными рабочими полостями // Проблемы и перспективы развития двигателестроения. 1998. № 1. С. 127–139.
6. Бояршинов М.Г., Скутин А.А. Разработка методики замены натурных испытаний численным моделированием динамических характеристик двигателя // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2015. № 1. С. 5–22.
7. Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н. Численные методы в задачах физика быстротекущих процессов. Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000.— 516 с.
8. Тестоедов Н.А., Косенко В.Е., Бартенев В.А. Пат. 2372258 Российская Федерация, В 64 G 1 50,F 25 В 45 00. Устройство герметизации емкости с рабочим телом и способ его изготовления; заявл. 23.06.08; опубл. 20.08.09, Бюл. № 23 (II ч.).— 3 с.
9. Тихонов Е.А., Григорьев И.В., Куницкая О.А. Силовая параметризация кривошипно-ползунной группы "Альфа-Стирлинга" // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 3. С. 45-48.

10. Тихонов Е.А., Григорьев И.В., Куницкая О.А. Параметризация механизма двигателя Стирлинга Альфа-типа // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 4 (44). С. 49-53.
11. Будник П.В., Шегельман И.Р. Эффективность заготовки деловой древесины и древесного топлива на лесосеке // Перспективы науки. 2012. № 12 (39). С. 103-105.
12. Шегельман И.Р., Будник П.В. Новые технические решения для заготовки деловой древесины и топливной щепы // Перспективы науки. 2012. № 6 (33). С. 107-109.
13. Grigorev I.V., Leonova O.N., Kalyashov V.A., Shvetsova V.V. [Creation and experimental verification of a mathematical model of industrial debarking] // Journal of Physics: Conference Series. Ser. "International Conference on Future of Engineering Systems and Technologies" 2020. C. 012021.
14. Grigorev I.V., Shadrin A.A., Voronova A.M., Kostyukevich N., Levushkin D.M., Borisov V.A., Diev R.I. [Improving the efficiency of wood chipping operations] // INMATEH - Agricultural Engineering. 2020. T. 61. № 2. C. 217-224.
15. Gasparyan G., Kunickaya O., Grigorev I., Ivanov V., Zhuk A., Burmistrova O., Manukovsky A.Y., Hertz E., Kremleva L., Mueller O. [Woodworking facilities: driving efficiency through automation applied to major process steps] // International Journal of Engineering and Technology(UAE). 2018. T. 7. № 4.7 Special Issue 7. C. 368-375.
16. Власов Ю.Н., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Хитров Е.Г., Рунова Е.М. Моделирование физико - механических свойств сырья для производства топливных брикетов // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 2 (46). С. 40-46.
17. Тамби А.А., Морковина С.С., Григорьев И.В., Григорьев В.И. Развитие циркулярной экономики в России: рынок биотоплива // Лесотехнический журнал. 2019. Т. 9. № 4 (36). С. 173-185.
18. Safin R.R., Salimgaraeva R.V., Safina A.V., Mukhametzyanov Sh.R., Kraysman N.V. [Impact of a reactor design features on wood raw materials torrefaction parameters] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2020. C. 62095.
19. Safin R.R., Khakimzyanov I.F., Galyavetdinov N.R., Mukhametzyanov S.R. [Gasification of torrefied fuel at power generation for decentralized consumers] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Ser. "Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering - Power Supply of Mining Companies" 2017. C. 032035.
20. Safin R.R., Khakimzyanov I.F., Kaynov P.A., Mukhametzyanov Sh.R., Shaikhutdinova A.R. [The effect of temperature of pre-heat treatment of solid wood fuel on the performance of complex for drying of wood] // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016. Conference Proceedings. 2016. C. 719-724.

© **Тихонов Е.А.** – канд. техн. наук, доцент кафедры транспортных и технологических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ПГУ»), e-mail: tihonov@psu.karelia.ru; **Куницкая О.А.** – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии и оборудования лесного комплекса, ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», (ФГБОУ ВО «АГАТУ»), e-mail: olaola07@mail.ru; **Швецова В.В.** – канд. техн. наук, доцент кафедры начертательной геометрии и инженерной графики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»), e-mail: vikt.schvetzova2012@yandex.ru; **Калита Г.А.** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии лесопользования и ландшафтного строительства, ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ТГУ»), e-mail: g.kalita@mail.ru; **Фам Нгок Линь** – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры механики, Университет Шао До, Вьетнам, e-mail: linhpham110@gmail.com.

UDC 621.1

MULTI-CRITERIA PARAMETERIZATION OF THE "ALPHA" TYPE STIRLING ENGINE MECHANISM FOR ADAPTATION TO APPLICATION IN THE TIMBER INDUSTRY

This article discusses the multi-criteria parameterization of the crank-slider group of the Stirling engine type "alpha". Multi-criteria implies the introduction of different lengths of connecting rods of the piston and the displacer, the variable angle between the cylinder axes, as well as the intersecting axes of the cylinders and the crankshaft. The dependences of the displacement of the piston and the displacer are obtained, taking into

account a number of variable geometric parameters. The boundary conditions of the ratio of the lengths of the connecting rods of the piston and the displacer are determined, taking into account the displacement of the cylinder axes in the plane perpendicular to the axis of the crankshaft. The resulting equation of movement of the piston from displacement of the propellant is composed of a crankshaft angle, which will allow to obtain a numerical model simulation of the crank and connecting rods that will significantly reduce the cost of numerical calculations. The dependence of the torque on the crankshaft at known pressures on the piston and the impactor with a free arrangement of the crank-slider mechanism of the Stirling engine of the "alpha" type is obtained. This study will eventually allow us to determine the optimal parameters of the designed steering engine, depending on the power and operating temperatures. This will allow us to design an engine for use in the timber industry. It implies the use of logging and woodworking waste as fuel for an electric generator based on the Stirling engine. These fuels have a certain Gorenje-perature and specific heat of combustion. Their effective use for energy generation is an urgent task of the forest complex. currently, The obtained torque equation will allow us to study the working process of the engine when solving the gas-dynamic problem of cyclic flow of gas ("working body") from the cavity of the piston cylinder to the cavity of the displacer cylinder and back.

Keywords: Stirling, type "alpha", displacement of the piston and displacer, torque, parameterization.

References

1. Diesel generator Consumption // <http://machineries.ru/> URL: http://machineries.ru/a_19.html (accessed: 06.12.2018). (InRuss.).
2. SHalaj V.V., Makushev YU.P. [External combustion engine] // Omskij nauchnyj vestnik [Omsk Scientific Bulletin]. 2008. № 3.ppC. 65–71. (InRuss.).
3. Korneev S. A. [the Stirling Engine (history, present and perspective)] // Problemy mashinostroeniya i avtomatizacii [Problems of machine construction and automation]. 2011. № 2. pp. 132–135. (InRuss.).
4. Savchenko V. A., Stolyarov S. P. [on the intensification of the heat flow into the cooling system from the Stirling engine's cylinder-piston group due to the Shuttle effect] // Trudy Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo morskogo universiteta [Proceedings of the Saint Petersburg state Maritime University]. 2014. № 1. pp. 31–37. (InRuss.).
5. Lukachev S. V., Dovgyallo A. I., Belozertsev V. N. [Thermomechanical converters with strong working cavities] // Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya [Problems and prospects of engine building development]. 1998. № 1. pp. 127–139. (InRuss.).
6. Boyarshinov M. G., Skutin A. A. [Development of methods for replacing field tests with numerical modeling of engine dynamic characteristics] // Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya [Transport. Transport equipment. Ecology]. 2015. № 1. pp. 5–22. (InRuss.).
7. Babkin A.V., Kolpakov V. I., Okhitin V. N. [Numerical methods in problems of fast-moving processes physics]. Moskva: MGTU im. N. E. Baumana [Moscow: Bauman Moscow state technical University], 2000.— 516 P. (InRuss.).
8. Testodov N.A., Kosenko V.E., Bartenev V.A. Pat. 2372258 Rossijskaya Federaciya, B 64 G 1 50,F 25 B 45 00. [Device for sealing a container with a working fluid and a method for its manufacture]; application 23.06.08; publ. 20.08.09, bul . no. 23 (II CH.) – 3 p. (InRuss.).
9. Tikhonov E. A., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A. [Power parametrization of the crank-slider group "alpha-Stirling"] // Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya [Repair. Restoration. Modernization]. 2020. № 3. pp. 45-48. (InRuss.).
10. Tikhonov E. A., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A. [Parametrization of the Stirling engine mechanism alpha-type] // Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies]. 2019. № 4 (44). pp. 49-53. (InRuss.).
11. Budnik P. V., Shegelman I. R. [Efficiency of preparation of business wood and wood fuel in the cutting area] // Perspektivy nauki [Prospects of science]. 2012. № 12 (39). pp. 103-105. (InRuss.).
12. Shegelman I. R., Budnik P. V. [New technical solutions for harvesting busin ess wood and fuel chips] // Perspektivy nauki [Prospects of science]. 2012. № 6 (33). pp. 107-109. (InRuss.).
13. Grigorev I.V., Leonova O.N., Kalyashov V.A., Shvetsova V.V. Creation and experimental verification of a mathematical model of industrial debarking // Journal of Physics: Conference Series. Ser. "International Conference on Future of Engineering Systems and Technologies" 2020. C. 012021.

14. Grigorev I.V., Shadrin A.A., Voronova A.M., Kostyukevich N., Levushkin D.M., Borisov V.A., Diev R.I. [Improving the efficiency of wood chipping operations] // INMATEH - Agricultural Engineering. 2020. T. 61. № 2. pp. 217-224.

15. Gasparyan G., Kunickaya O., Grigorev I., Ivanov V., Zhuk A., Burmistrova O., Manukovsky A.Y., Hertz E., Kremleva L., Mueller O. [Woodworking facilities: driving efficiency through automation applied to major process steps] // International Journal of Engineering and Technology(UAE). 2018. T. 7. № 4.7 Special Issue 7. pp. 368-375.

16. Vlasov Yu. N., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Khitrov E. G., Runova E. M. [Modeling of physical and mechanical properties of raw materials for the production of fuel briquettes] // Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies]. 2020. № 2 (46). pp. 40-46. (InRuss.).

17. Tambi A. A., Morkovina S. S., Grigorev I. V., Grigorev V. I. [Development of the circular economy in Russia: the biofuel market] // Lesotekhnicheskij zhurnal [Forest Engineering Magazine]. 2019. № 4 (36). pp 173-185. (InRuss.).

18. Safin R.R., Salimgaraeva R.V., Safina A.V., Mukhametzyanov Sh.R., Kraysman N.V. Impact of a reactor design features on wood raw materials torrefaction parameters // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2020. C. 62095.

19. Safin R.R., Khakimzyanov I.F., Galyavetdinov N.R., Mukhametzyanov S.R. Gasification of torrefied fuel at power generation for decentralized consumers // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Cep. "Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering - Power Supply of Mining Companies" 2017. C. 032035.

20. Safin R.R., Khakimzyanov I.F., Kaynov P.A., Mukhametzyanov Sh.R., Shaikhutdinova A.R. [The effect of temperature of pre-heat treatment of solid wood fuel on the performance of complex for drying of wood] // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016. Conference Proceedings. 2016. pp. 719-724.

© **Tikhonov E.A** – PhD of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport and Technological Machines and Equipment, «Petrozavodsk State University» (PSU), e-mail: tihonov@psu.karelia.ru; **Kunitskaya O.A.** – Grand PhD in Engineering sciences, professor of the Department of Technologies and equipment of the forest complex, Arctic State Agrotechnological University (ASATU)), e-mail: ola.ola07@mail.ru; **Shvetsova V.V.** – PhD of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Descriptive Geometry and Engineering Graphics «St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering» (SPUACE), e-mail: vikt.schvetzova2012@yandex.ru; **Kalita G.A.** – PhD of Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Forest management and landscape construction technologies, Pacific State University (PSU)), e-mail: g.kalita@mail.ru; **Pham Ngoc Lin** – PhD of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Mechanics, Shao Do University, Vietnam, e-mail: linhpham110@gmail.com.

Физико-механические процессы в деревообработке

УДК 674.213.049

ПРИМЕНЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ ТОПОЛЯ В ОТДЕЛКЕ ИНТЕРЬЕРА

Д.В. Шейкман

Работа посвящена возможности использования древесины тополя с улучшенными физико-механическими свойствами в интерьерной отделке помещений, строительстве и других областях народного хозяйства. Исследуемая древесина тополя считается самой высокорепродуктивной породой с чрезвычайно развитой сосудистой системой. Решение задачи улучшения физико-механических свойств древесины мягких лиственных пород усовершенствуется и становится все более сложным и разнообразным. Ранее проведенные исследования показывают, что применение синтетических полимеров, вводимых в пористую структуру древесины для улучшения физико-механических свойств, является наиболее эффективным способом, данный материал, обладает комплексом ценных свойств, кроме повышения износостойкости и долговечности. Анализ проведенных исследований показывает, что введенная акриловая композиция оказывает большое влияние на прочность при статическом изгибе и повышает прочность модифицированной древесины тополя. Модифицированная таким способом древесина тополя отличается повышенной водостойкостью и малому воздействию влажностных деформаций, что обуславливает использование данного материала в помещениях с высокой влажностью.

Ключевые слова: модифицирование древесины, пропитка древесины, физико-механические свойства древесины, лиственные породы древесины.

Введение

В последнее время большое внимание уделяется промышленному использованию древесины мягких лиственных пород, к повышению качественных показателей древесины для ее традиционного использования в интерьере, строительстве и других областях народного хозяйства. В решении этих вопросов важное значение имеет усовершенствование физико-механических свойств древесины. Решение задачи улучшения физико-механических свойств древесины мягких лиственных пород усовершенствуется и становится все более сложным и разнообразным.

Перспективное решение данных проблем – модифицирование древесины, позволяющие искусственно изменять структуру древесины и ее компонентов физическими, механическими и химическими методами на различных структурных уровнях [1].

В настоящее время известны такие способы модифицирования древесины как Термомеханическое модифицирование; Термохимическое модифицирование; Химико-механическое модифицирование; Химическое модифицирование и Радиационно-химическое для улучшения физико-механических свойств древесины. Дополнительные способы обработки – воздействие ультразвуком, импульсным магнитным полем, намагничиванием пропиточных составов [2].

Разработан математический аппарат, обеспечивающий решение обратной задачи оптимизации, т.е. задачи с известными значениями откликов и неизвестными входными параметрами (технологические режимы процесса модифицирования) [3].

В той или иной степени, каждый из перечисленных способов подходит для выполнения поставленной задачи улучшения физико-механических свойств древесины мягких лиственных пород. В современном мире ставятся задачи для выявления технических предложений, путем анализа и дальнейшей реализации технико-экономического решения. При анализе известных способов модифицирования древесины разрабатываются новые варианты решения задачи улучшения физико-механических свойств древесины мягких лиственных пород и выбирается наилучшее решение.

Благодаря исключительным свойствам и сравнительному изобилию древесина на протяжении столетий является ценным инженерным материалом, и, во многих случаях, технологический прогресс

делает древесину еще более полезной. Древесине присущи разнообразные характерные особенности, выдвигающие ее на передний край в ряду сырьевых материалов: это легкий и в то же время прочный материал, который хорошо поддается механической обработке, облагораживанию и склеиванию, модификации, отличается низкой теплопроводностью и неповторимой красотой, пропитывается различными материалами и т.д. Но из-за растущих потребностей человечества натуральная высококачественная древесина становится все более дефицитной. Поэтому с особой актуальностью встает задача максимально полного использования природных древесных ресурсов за счет более широкого применения там, где это возможно, малоценной древесины лиственных пород, таких как осина, ольха и тополь. Решить эту задачу призваны древесные композиционные материалы, состоящие из наполнителя – массивной древесины или ее частиц, и еще одного или нескольких компонентов (полимера, минерала и др.) – матрицы, между которыми имеется граница раздела. Свойства композиционных материалов зависят от состава композита, способа его производства и могут значительно отличаться от исходных свойств и наполнителя, и матрицы [4].

Массивная древесина – слоисто-волоконистый материал, и представляет собой неоднородную пористую систему, основным структурным элементом которой является клеточная стенка, образованная в процессе биосинтеза сочетанием целлюлозы, лигнина и гемицеллюлозы. Аморфной матрицей этого природного композита служит лигнин, наполнителем – микроскопические волокна целлюлозы длиной не более 1 мм у древесины многих лиственных пород [5]. Пропиточные составы, заполняющие поры и сосуды древесины и пропитывающие стенки клеток, обеспечивают повышение устойчивости стенок к механическим воздействиям [6].

В данном исследовании рассматривается один из способов модифицирования древесины мягких лиственных пород, в частности модифицирование древесины тополя. Физико-механические свойства древесины тополя черного, растущего в Сибири, не изучены [7].

Древесина тополя самая высокорепродуктивная порода с чрезвычайно развитой сосудистой системой. По данным Б.Н. Уголева [8] содержание сосудов, т.е. элементов продольной проницаемости, составляет 33 – 37 %, это значительно больше, чем у древесины березы. У древесины тополя широкие годовичные кольца. Благодаря большому содержанию сердцевинных лучей и элементов поперечной проницаемости древесина тополя хорошо пропитывается различными составами.

В ходе эксперимента ставились задачи по исследованию измерения предела прочности при статическом изгибе от величины упрессовки образцов модифицированной древесины тополя, произрастающего в Уральском регионе.

По данным литературных источников предел прочности древесины тополя при статическом изгибе колеблется от 330 до 845 кг/см² [7]. Наиболее высокими физико-механическими свойствами характеризуется древесина тополя черного, произрастающего на Украине, в Узбекистане и Саратовской области [9].

Методы и материалы

Для проведения экспериментов в лабораторных условиях использовались образцы из массивной древесины тополя, заготовленной в Уральском учебно-опытном лесхозе УГЛТУ и других лесозаготовительных и деревообрабатывающих предприятиях Уральского региона. На Урале произрастает тополь черный (*Populus nigra* Ait.). Род *Populus* относится к семейству *Salicaceae* Mirbel – ивовые. Различными исследователями предложен ряд классификаций рода тополь [10]. В нашей стране, наиболее распространенной является классификация, согласно которой тополь черный относится к подроду настоящих тополей *Eurpopulus* Dode, секции *Aegirus* Aschers – тополи черные [7].

Чтобы свести ошибки к минимуму, для проведения эксперимента образцы, профрезерованные по сечению и одинаковой плотности, радиальные или полурadiальные (наклон годовичного кольца к пласти заготовок до 30°), подбирались по виду распила, чтобы в процессе пропитки акриловая композиция проникала в образцы с одинаковой степенью проникновения.

Влажность образцов определялась в соответствии с ГОСТ 16588-91 «Пилопродукция и деревянные детали. Методы определения влажности» и составляла 10 ± 2 %.

Определение предела прочности при статическом изгибе проводилось на испытательной машине ВЕВ по ГОСТ 16483.3-83 «Древесина. Метод определения предела прочности при статическом изгибе».

В основе акриловой композиции, применяемой в данных исследованиях, лежат высокомолекулярные термопластичные полиакрилаты. Акриловая композиция создает полупрозрачное

защитно-декоративное, влаго- и атмосферостойкое покрытие, подчеркивающее текстуру древесины, а также предназначена для защиты от грибков. Данный состав акриловой композиции не имеет резкого запаха, экологически безопасен. К недостаткам акриловой композиции можно отнести термопластичность. Техническая характеристика акриловой композиции приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Техническая характеристика акриловой композиции

Наименование показателя	Значение
Расход на один слой, г/м ²	70-100
Сухой остаток, %	14-18
Вязкость при поставке по ВЗ-4, с	11-15
Толщина нанесения, мкм (для мокрого слоя в 2-3 слоя)	60-80

Предел прочности при статическом изгибе у исследуемых образцов древесины тополя до модифицирования равен 41 – 48 МПа.

На образцы древесины тополя наносилась пропиточная акриловая композиция. Пропитанные образцы подсушивались при температуре 30-40 °С в течение 20 минут до состояния на отлип, а затем подвергались термообработке при температуре 90-110 °С, с последующей подпрессовкой на 1,5 и 2 мм в плитах пресса. Для регулировки величины уплотнения пропитанных образцов на заданную величину, между плитами пресса использовались калиброванные пластины.

Далее, образцы древесины тополя, пропитанные акриловой композицией и уплотнённые на заданную величину, испытывались по общепринятой методике испытаний модифицированной древесины на статический изгиб.

На некоторых образцах после нанесения пропиточного состава с пигментными частицами для имитации экзотических пород древесины наблюдается неравномерное распределение красителя, что связано с разнообразием текстуры древесины и особенностью случайных отклонений анатомического строения древесины тополя. Однако, такие отклонения не превышали 3 %. Некоторые экземпляры имеют необычный рисунок, такие ламели предлагается использовать в отделке стеновых панелей. Пример использования представлен на рисунке 1.



Рис. 1. Пример использования модифицированной древесины тополя при отделке стеновыми панелями уборной комнаты

Для интерьерной отделки стен нет необходимости полного пропитывания древесины тополя. Достаточно поверхностного нанесения пропиточного состава на заготовку и последующего термоуплотнения.

Мансардная крыша при строительстве в дачном и коттеджном домостроении используется для получения полезной площади жилого помещения. Часто при строительстве домов с мансардной крышей встает вопрос о грамотном использовании квадратных метров. Как правило это пространство либо никак не используется, либо в лучшем случае, используют как места для хранения. С эстетической точки зрения такое оформление стен в эко-стиле, основой интерьерной отделки которого являются исключительно

натуральные природные материалы правильная форма, простой дизайн и природные цвета. С новым веянием интерьерного оформления применять полученные стеновые панели можно и в стиле высоких технологий Хай-тек, базирующемся на эстетике конструктивных систем, использующих новые материалы и технологии. Модифицированная древесина тополя также будет сочетаться с разнообразными отделочными материалами, например, камнем.

Результаты

Из литературных источников известно, что древесина тополя характеризуется большей мягкостью и гибкостью. После проведения мероприятий по улучшению физико-механических свойств древесины тополя, получена величина предела прочности при статическом изгибе при упрессовке заготовки 2 мм равна 112 МПа (рис. 2). При этом видно, что после модифицирования при выдержке 6 часов, древесина тополя очень сильно потеряла предел прочности по сравнению с двух часовой выдержкой, и прочность при статическом изгибе равна 90 МПа, следовательно, при повышении времени выдержки прочностной показатель модифицирования древесины тополя падает. Прочность модифицированной древесины тополя при упрессовке 1,5 мм и шестичасовой выдержки показатель предела прочности при статическом изгибе немного уступает показателям при двухчасовой выдержке достигает предела прочности в 96 МПа.

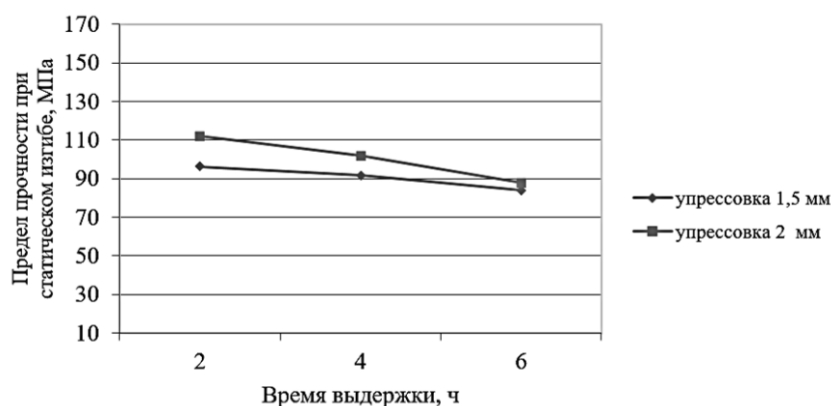


Рис. 2. Предел прочности при статическом изгибе модифицированной древесины тополя

Из графика видно, что значительное увеличение времени выдержки приводит к снижению показателя прочности при статическом изгибе для модифицированной древесины тополя. Пропитка акриловой композицией древесины тополя позволила при выдержке в течение 6 часов повысить предел прочности при статическом изгибе до 90 МПа. Древесина тополя при варьировании времени выдержки до прессования от 2 до 6 ч набирает прочность до 110...118 МПа.

За счет повышения температуры пропитывающего состава кинетическая энергия его частиц увеличивается, и они проникают вглубь древесины на большую величину, что ведет к увеличению толщины пластифицированного слоя, общая упрессовка которого становится меньше. Упругопластические деформации при небольших степенях упрессовки в большей степени восстанавливают древесину, что ведет к уменьшению толщины износостойкого слоя получаемого материала.

Большая величина упрессовки сказывается на прочности эксплуатационного слоя, поэтому модифицированная древесина тополя при повышении величины упрессовки теряет определенный запас прочности. У тополя имеется первоначальная гибкость, которая при повышении прочности поверхностных слоев теряется, и он становится более хрупким. На предварительных исследованиях по модифицированию древесины тополя был получен низкий результат предела прочности при статическом изгибе 40 МПа при упрессовке в 4 мм. Максимальный показатель предела прочности при статическом изгибе наблюдается при упрессовке в 2 мм и составляет 112 МПа.

В ходе проведенных исследований по модифицированию древесины тополя было изучено влияние времени выдержки после пропитки акриловой композицией до прессования и величины упрессовки на предел прочности при статическом изгибе модифицированного материала.

Получив оптимальные параметры и режимы модифицирования древесины тополя в специализированных лабораториях провели микросъемку радиального торцового среза полученного

материала на электронном микроскопе JSM-6390 рисунке 3. На снимке достаточно хорошо виден уплотненный слой со стороны нанесенного пропиточного состава при максимальном значении предела прочности, этот слой и несет основную нагрузку при эксплуатации [11].

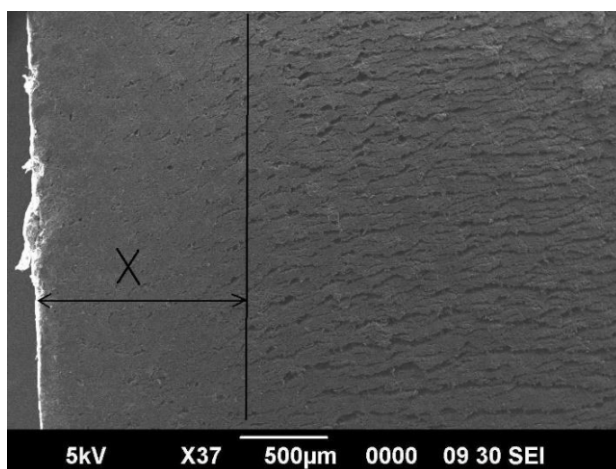


Рис. 3. Снимок торцового среза модифицированной древесины тополя с увеличением 37х, слева видно уплотнение поверхностного слоя

На представленном снимке видно, как глубоко проникает пропиточная акриловая композиция и под действием температуры происходит реакция глубокой поликонденсации фиксируясь уплотнением получается износостойкий полимерный слой не плавкий и нерастворимый.

Оптимальным решением будет использование акриловой пропиточной композиции без предварительного нагрева, что позволит оставить деформации на незначительной величине. Продолжительный нагрев пропиточной композиции, кроме того, приведет как к ухудшению экологической обстановки, так и снижает свойства получаемого материала [4].

Заключение

В проведенных исследованиях по улучшению физико-механических свойств древесины тополя и возможности применения повышенной температуры для активации акриловой композиции с применением дополнительного цикла подпрессовки можно сделать следующие выводы.

Благодаря присутствию высокомолекулярных термопластичных акрилатов и других компонентов в акриловой композиции повышается прочность при статическом изгибе. Снижается хрупкость, создается полупрозрачное защитно-декоративное, влаго- и атмосферостойкое покрытие, стойкое к грибкам, подчеркивающее текстуру древесины и повышается долговечность.

При термоуплотнении, необходимо устанавливать оптимальное усилие прессования с учетом допускаемой деформации древесины чтобы не допустить разрушения структуры древесины тополя, а значит снижения физико-механических показателей, и в то же время достичь необходимой глубины проникновения пропиточного состава и необходимой степени уплотнения для его полного отверждения.

Анализ проведенных исследований показывает, что введенная акриловая композиция оказывает большое влияние на прочность при статическом изгибе и повышает прочность модифицированной древесины тополя.

Модифицированная древесина тополя отличается повышенной водостойкостью и малому воздействию влажностных деформаций, что обуславливает использование данного материала в помещениях с высокой влажностью.

По большей части результат модифицирования древесины тополя зависит от вязкости состава модификатора, вводимого в древесину, глубины проникновения в сосудистую систему и реакции отверждения. Присутствие в поверхностном слое заготовки из древесины тополя пропиточной акриловой композиции после полимеризации и уплотнения приводит к образованию прочного поверхностного слоя, что позволяет повысить его предел прочности при статическом изгибе и улучшить другие физико-механические свойства древесины. При применении в пропиточной акриловой композиции пигментных красителей, полученный материал имитирует ценные породы древесины, а низкая стоимость сырья позволяет полностью заменить ценные породы и снизить себестоимость изделий. Данный материал, обладающий комплексом ценных

свойств, кроме повышения долговечности не требует дополнительной отделки, и полностью готов к использованию в отделке, после механической обработки по сечению.

Литература

1. Ханов А. М., Сиротенко Л.Д., Храмцов Ю.Д., Аношкин А.Н., Андреев П.Е. Прогнозирование свойств термомеханически модифицированной древесины; Рос. акад. наук, Урал. отд-ние, Ин-т техн. химии. - Екатеринбург: УрО РАН, 1997. - 143 с.
2. Шамаев В, Куницкая О, Анучин А. Инновационные разработки в области модификации древесины. ЛесПромИнформ №8 (138), 2018 г.
3. Гвозденко С. П., Оптимизированные режимы получения модифицированной древесины с заданными свойствами [Текст]: Автореферат дис.на соиск.ученой степ.канд.техн.наук / Сергей Петрович Гвозденко. - Воронеж: Б. и., 1999. - 17с.
4. Н.А. Кошелева, Д.В. Шейкман, Исследование процесса пропитки полимерами при модификации малоценных пород древесины / Вестник Казанского технологического университета: Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань: КНИТУ, Т18. №14. 126-131 (2015).
5. Б.Н. Уголев, Древесиноведение с основами лесного товароведения. МГУЛ. Москва. 2001. 225 с.
6. Шейкман Д.В., Кошелева Н.А. Исследование физико-механических свойств модифицированной древесины березы и осины// Вестник технологического университета. Казань. – Т.19 – № 15. 2016.
7. Бакулин В.Т, Тополь черный в Западной Сибири / В. Т. Бакулин ; отв. ред. И. Ю. Коропачинский; Российская акад. наук, Сибирское отд-ние, Центральный сибирский ботанический сад. - Новосибирск : Гео, 2007. - 121 с.
8. Перельгин Л.М. Древесиноведение / Л. М. Перельгин. - 2-е изд., перераб. и доп. Б.Н. Уголевым. - Москва : Лесн. пром-сть, 1969. - 316 с
9. Шаталов В.Г., Пойменные леса / В. Г. Шаталов, И. В. Трещевский, И. В. Якимов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Лесн. пром-сть, 1984. - 160 с.
10. Старова Н.В. Селекция ивовых / Н. В. Старова. - М. : Лесн. пром-сть, 1980. - 206 с
11. Шейкман Д.В. Модифицирование мягко-лиственных пород древесины для паркетных изделий / Ю.И. Ветошкин, Д.В. Шейкман, Д.В. Корелин // Деревообработка: технологии оборудование, менеджмент XXI века: сборник трудов IV международного Евразийского симпозиума. - Екатеринбург: УГЛТУ, 2009. – 392 с.

© Шейкман Д.В. – канд. техн. наук, доцент кафедры механической обработки древесины и производственной безопасности ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (ФГБОУ ВО «УГЛТУ»), e-mail: cheikman@yandex.ru.

UDC 674.213.049

APPLICATION OF MODIFIED POPLAR WOOD IN THE INTERIOR DECORATION

D.V. Sheykman

The work is devoted to the possibility of using poplar wood with improved physical and mechanical properties in interior decoration, construction and other areas of the national economy. The studied poplar wood is considered the most highly productive species with an extremely developed vascular system. The solution to the problem of improving the physical and mechanical properties of soft deciduous wood is being improved and becomes more and more complex and diverse. Previous studies show that the use of synthetic polymers introduced into the porous structure of wood to improve the physical and mechanical properties is the most effective method, this material has a set of valuable properties, in addition to increasing wear resistance and durability. The analysis of the conducted research shows that the introduced acrylic composition has a great effect on the strength in static bending and increases the strength of the modified poplar wood. Increased water resistance and low moisture deformation characterize poplar wood modified in this way, which makes the use of this material in rooms with high humidity.

Key words: wood modification, wood impregnation, physical and mechanical properties of wood, deciduous wood species

References

1. Khanov A.M., Sirotenko L.D., Khramtsov Yu.D., Anoshkin A.N., Andreev P.E. [Prediction of the properties of thermomechanically modified wood]; Grew up. acad. Sci., Ural. department, Institute of tech. chemistry. - Yekaterinburg: UB RAS, 1997. - 143 p. (InRuss.).
2. Shamaev V, Kunitskaya O, Anuchin A. [Innovative developments in the field of wood modification]. LesPromInform No. 8 (138), 2018 (InRuss.).
3. Gvozdenko SP, [Optimized modes of obtaining modified wood with desired properties]: [Abstract of the thesis for the degree of candidate of technical sciences] - Voronezh: B. and., 1999. - 17p. (InRuss.).
4. N.A. Kosheleva, D.V. Sheykman, [Investigation of the process of impregnation with polymers during the modification of low-value wood species] Bulletin of Kazan Technological University: Kazan. nat. issled. technol. un-t. - Kazan: KNITU, T18. No. 14. pp. 126-131 (2015). (InRuss.).
5. B.N. Ugolev, [Wood science with the basics of forest tavarology]. MGUL. Moscow. 2001. 225 p. (InRuss.).
6. Sheykman D.V., Kosheleva N.A. [Investigation of the physical and mechanical properties of modified birch and aspen wood] // Bulletin of the Technological University. Kazan. T.19, No. 15. 2016. (InRuss.).
7. Bakulin VT, [Black Poplar in Western Siberia] / VT Bakulin; otv. ed. I. Yu. Koropachinsky; Russian acad. Sciences, Siberian Branch, Central Siberian Botanical Garden. - Novosibirsk: Geo, 2007. - 121 p. (InRuss.).
8. Pereygin L.M. [Wood science] / L. M. Pereygin. - 2nd ed., Rev. and add. B.N. Coal. - Moscow: Lesn. Prom-st, 1969. - 316 p. (InRuss.).
9. Shatalov V.G., [Floodplain forests] / V. G. Shatalov, I. V. Treshchevsky, I. V. Yakimov. - 2nd ed., Rev. and add. - M.: Lesn. Prom-st, 1984. - 160 p. (InRuss.).
10. Starova N.V. [Willow breeding] / N.V. Starova. - M.: Lesn. Prom-st, 1980. - 206 p. (InRuss.).
11. Sheykman D.V. [Modification of soft-deciduous wood species for parquet products] / Yu.I. Vetoshkin, D.V. Sheykman, D.V. Korelin // [Woodworking: equipment technologies, management of the XXI century: collection of works of the IV international Eurasian symposium]. - Yekaterinburg: UGLTU, 2009. - 392 p. (InRuss.).

© Sheykman D.V. – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical wood processing and production security «Ural State Forestry Engineering University» (USFEU), e-mail: cheikman@yandex.ru.

УДК 531.754; 615.322

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ПЛОТНОСТИ ЧАГИ

Ренат Х. Гайнуллин, А.В. Сафина, Е.М. Цветкова, Ришат Х. Гайнуллин, В.В. Губернаторов

В статье приведены результаты исследований по определению средней плотности чаги. В результате критического анализа конструкций и приборов для определения объема образцов предложена новая оригинальная конструкция экспериментальной установки, основанная на методе вытеснения жидкости. Выявлено, что погрешность измерений объема пористых тел на данной установке составляет менее 2 %. Исследованию подвергались образцы высушенной чаги, представляющие разные зоны тела гриба: внутреннюю, примыкающую к стволу дерева, поверхностную и само плодовое тело. На основе экспериментальных объемных и весовых данных образцов определено значение средней плотности чаги, которое составляет в различных зонах от 328 кг/м³ до 823 кг/м³. Установлено, что значение средней плотности уменьшается от периферии чаги к месту примыкания тела гриба к стволу дерева. Такое распределение средней плотности требует оптимизации процесса экстракции чаги с учетом различных зон гриба.

Ключевые слова: чага, средняя плотность чаги, методы определения плотности.

Введение

В настоящее время популярность чаги как ценного сырья для медицины, фармацевтики, пищевой промышленности и других отраслей постоянно увеличивается [1-4]. Не смотря на многочисленные исследования полезных свойств чаги, актуальными остаются вопросы оптимизации технологий извлечения ценных компонентов посредством математического моделирования процессов экстракции [5-7]. Одним из важных параметров моделирования стадии пропитки растительного материала экстрагентами является его средняя плотность [8, 9]. Как правило, плотность материалов при различной влажности имеет различные значения [10-12]. То есть в процессе заготовки чаги ее средняя плотность будет иметь одно значение, после сушки – второе, а в порошкообразном виде – третье. Если проводить аналогию с древесиной, то можно отметить, что плотности свежесрубленной древесины, древесины после сушки, а также опилок после переработки древесины, в зависимости от породы, имеют определенные численные значения, которые можно найти в справочных материалах [13-16]. К сожалению, в имеющихся литературных источниках отсутствуют такие данные для чаги, и невозможно отыскать сколь-нибудь достоверные значения средней плотности растущей или абсолютно сухой чаги.

Самым простейшим способом определения плотности является стереометрический метод, заключающийся в нахождении частного от деления массы исследуемого образца на его геометрический объем. Данный способ осуществим при возможности определения объема тела исходя из правильности его формы и измерения линейных размеров. В противном случае, что довольно часто встречается на практике, необходимо использовать иные методы определения объема тела. Среди них выделяют прямые методы (например, пикнометрический (метод вытеснения) с использованием жидкостей или газов, метод гидростатического взвешивания) и косвенные (например, ультразвуковой и радиационный методы) [17-19].

Растительное происхождение чаги обуславливает ее сложное строение, пористую структуру и неправильную геометрическую форму [20-22]. Для определения объема тела неправильной геометрической формы наиболее распространенным является метод вытеснения жидкости [11]. Данный метод имеет различные технические воплощения. Главным его недостатком является намокание образца в процессе измерения, что может повлечь за собой появление больших погрешностей в случае пористых материалов. Для устранения этого недостатка образцы покрывают тонким слоем непроницаемого состава или помещают в непроницаемую оболочку. В первом случае образцы невозможно было использовать для дальнейших исследований, а во втором – значительно увеличивалось время проведения измерений.

В работе [23] предложен прибор для измерения объема образцов, имеющих плоскую форму, включающий сосуд с перфорированным дном, съемную крышку, отсчетное устройство и эластичную пленку, расположенную между отсчетным устройством и перфорированным дном. Перед измерением сосуд наполняют водой до нулевой отметки по отсчетному устройству. Затем образец помещают между перфорированным дном и эластичной пленкой, которая прижимается к исследуемому образцу за счет давления на нее жидкости. Недостатком данного прибора является завышение измеряемых объемов, обусловленное неполным охватом эластичной пленкой нижних частей боковых граней образца, которые примыкают к перфорированному дну, что вызвано упругостью эластичной пленки и недостаточным давлением жидкости для полного прижатия пленки к образцу по всей поверхности контакта.

В настоящей работе поставлена задача спроектировать экспериментальную установку для определения объема тела неправильной геометрической формы на основе критического анализа вышеизложенных способов, провести исследования и определить значение средней плотности в различных зонах гриба.

Методы и материалы

Для проведения исследований была разработана и спроектирована экспериментальная установка для измерения объема пористых тел [24], представленная на рисунке 1. Установка состоит из прозрачного корпуса 1, верхняя часть которого имеет шкалу 2 для измерений, а в нижней торцевой части находится эластичная пленка 3, вентиля 4, плоского дна 5 с вмонтированной площадкой 6 из перфорированного материала, соединенной с помощью пневмопровода 7 с вакуумирующим устройством 8.

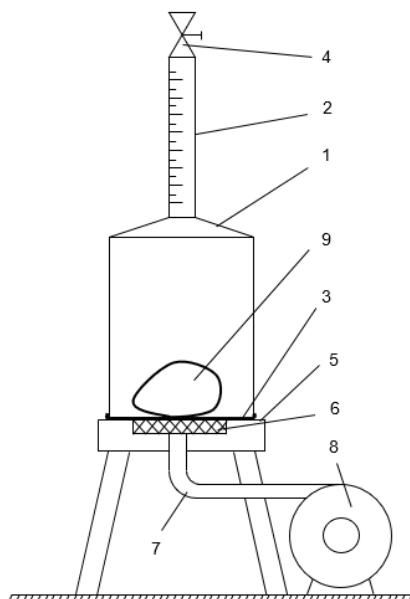


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – прозрачный корпус, 2 – шкала для измерений, 3 – эластичная пленка, 4 – вентиль, 6 – площадка из перфорированного материала, 7 – пневмопровод, 8 – вакуумирующее устройство, 9 – исследуемый образец

Процесс измерения объема образца происходит следующим образом. Первоначально корпус 1 устанавливают на плоское дно 5 и через вентиль 4 заполняют водой до нулевой отметки отсчетного устройства. После закрытия вентиля 4 корпус 1 отрывают от плоского дна 5, поднимая его вверх, и на площадку 6 из перфорированного материала устанавливают исследуемый образец 9. Затем корпус 1 устанавливают на плоское дно 5, параллельно открывая вентиль 4. При этом эластичная пленка 3 охватывает исследуемый образец 9. Далее включают привод вакуумирующего устройства 8, которое создает разрежение и удаляет остатки воздуха между пленкой 3 и исследуемым образцом 9 через площадку 6 из перфорированного материала и пневмопровод 7. Таким образом осуществляется полный охват исследуемого образца 9 эластичной пленкой 3 по всей поверхности контакта. Объем измеряемого образца 9 определяют в единицах объема по шкале 2.

В дальнейшем для проведения экспериментальных исследований по определению средней плотности был подготовлен фрагмент высушенной чаги (рис. 2), разрезанный на пронумерованные образцы. Из них: образцы 1-9 это внутренняя зона гриба, примыкающая к стволу дерева; образцы 10,18, 19-22,27, 28-31 – поверхностная зона и оставшиеся образцы – основное тело гриба.



Рис. 2. Образцы высушенной чаги

Каждый из представленных образцов взвешивался на электронных весах Vibra с точностью до 0,001 г.

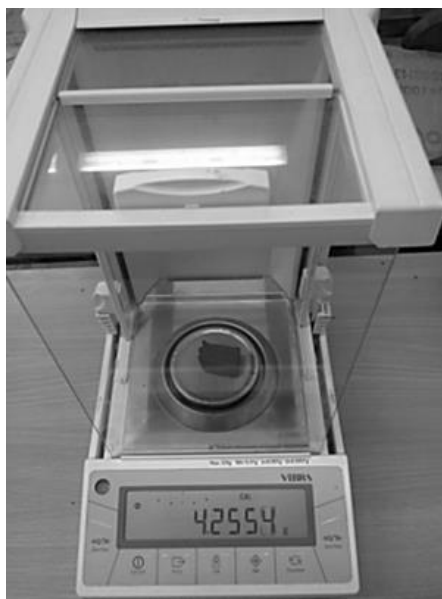


Рис. 3. Взвешивание образцов

Результаты

Первоначально для определения точности измерения объема с использованием предлагаемой экспериментальной установки, были выбраны несколько образцов правильной геометрической формы. Объемы этих образцов были определены двумя способами: путем умножения линейных размеров, измеренных штангенциркулем, и с помощью предлагаемой установки. Результаты сравнения двух способов измерения представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты сравнения способов определения объемов образцов чаги

№ образца	Линейные размеры, мм			Объем образца, определенный по линейным размерам, см ³	Объем образца, определенный с помощью установки, см ³	Погрешность, %
	ширина	толщина	высота			
11	19,1	19	30,1	10,92	10,9	0,18
12	17,8	19	30,1	10,18	10,1	0,79
13	17,5	19	30,1	10,01	9,9	1,1
14	19	19	30,1	10,87	10,7	1,56
16	17,4	19	30,1	9,95	9,9	0,5
17	18	19	30,1	10,29	10,1	1,85

Сравнительный анализ результатов измерений показывает, что максимальное расхождение сопоставляемых данных составляет 1,85 %, что в целом характеризует адекватность предлагаемого способа измерения объема образцов чаги.

Далее были измерены объемы всех образцов с использованием предлагаемой лабораторной установки. По результатам измерения объемов образцов и их массы были определены значения средней плотности образцов. Результаты экспериментальных и расчетных данных приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты экспериментальных данных по определению средней плотности образцов чаги

№ образца	Масса образца, г	Объем образца, см ³	Средняя плотность, кг/м ³	№ образца	Масса образца, г	Объем образца, см ³	Средняя плотность, кг/м ³
1	2,397	3,3	726	17	4,114	10,1	407
2	2,671	3,6	742	18	6,654	11,5	579
3	3,501	4,5	778	19	2,782	6,7	415
4	5,259	8,9	591	20	4,227	10,7	395
5	5,132	9,8	524	21	4,500	11,1	405
6	5,306	10,6	501	22	3,574	9,5	376
7	5,563	9,6	579	23	3,417	9,4	364
8	4,072	6,5	626	24	3,853	10,3	374
9	2,552	3,1	823	25	3,102	8,3	374
10	4,862	10,5	463	26	2,769	7,5	369
11	5,695	10,9	522	27	3,181	7,4	430
12	4,697	10,1	465	28	3,274	8,0	409
13	4,282	9,9	433	29	2,865	8,3	345
14	4,034	10,7	378	30	2,461	6,9	357
15	3,050	9,3	328	31	1,973	5,3	372
16	3,397	9,9	343				

Для наглядности распределение плотности по образцу отражено на контурной плоскости (рис. 4) и трехмерном графике (рис. 5).

Согласно данным таблицы 2 и рисунков 4 и 5, наибольшая величина средней плотности чаги составила 823 кг/м³, наименьшая – 328 кг/м³. При этом наблюдается сильный разброс плотности по телу чаги: плотность уменьшается от периферии к месту примыкания гриба к стволу дерева. Такое распределение средней плотности требует оптимизации процесса экстракции чаги с учетом различных зон гриба.

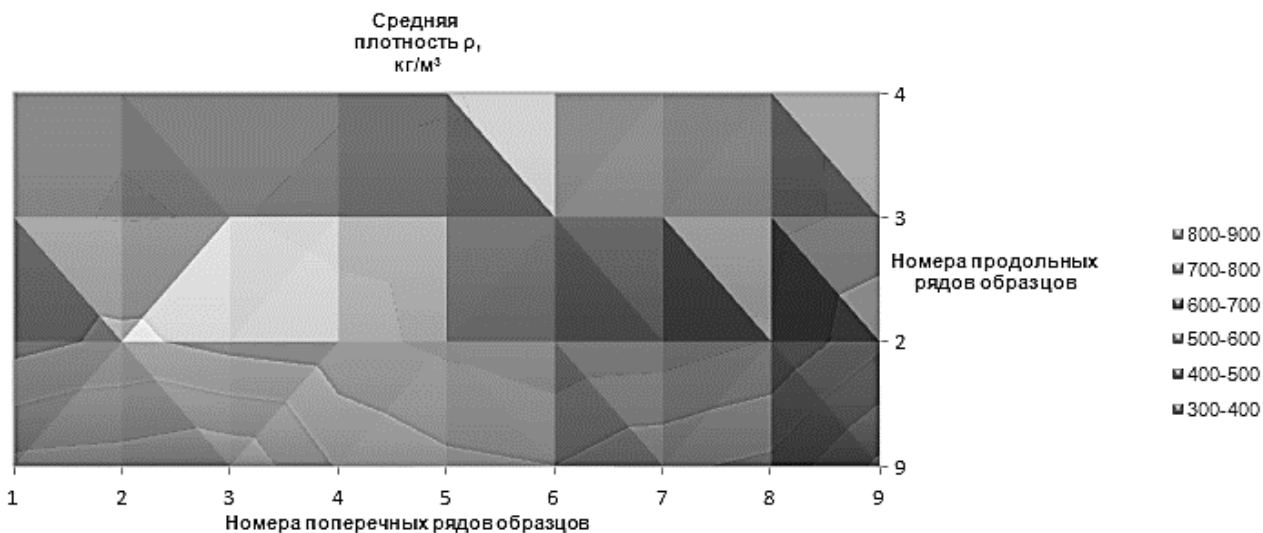


Рис. 4. Распределение средней плотности на контурной плоскости образца

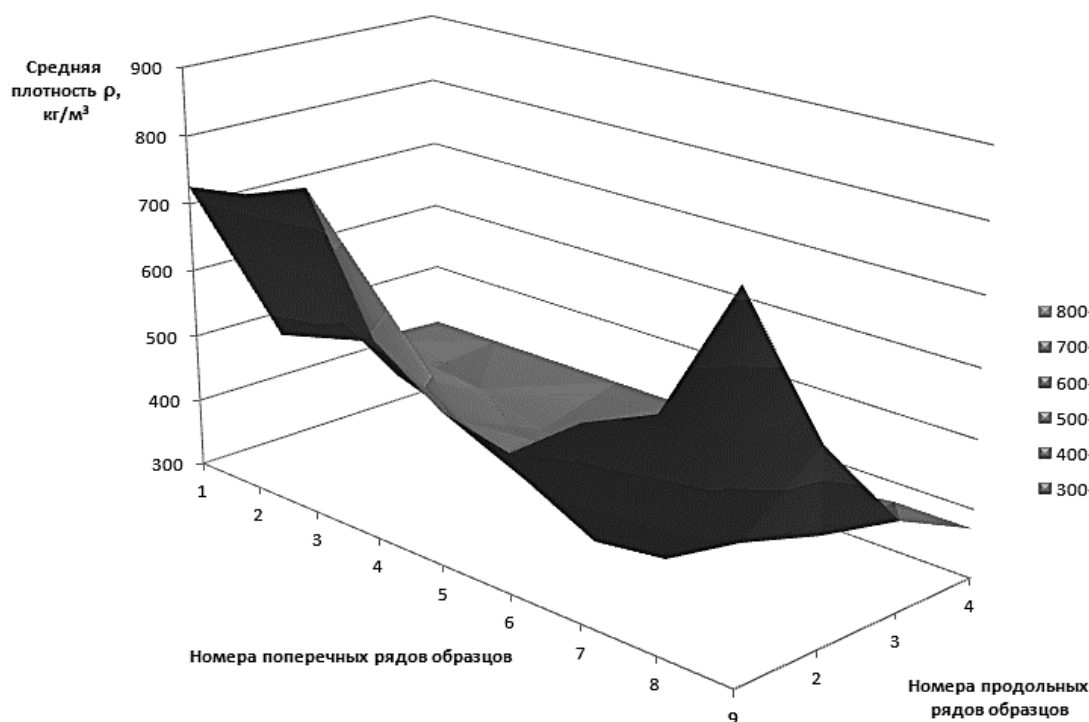


Рис. 5. Трехмерный график распределения плотности по образцу

Заключение

Уникальные свойства березового гриба чаги определяют различные направления исследований и возможности его использования в различных отраслях промышленности. Вследствие наличия ценных химических и биологических компонентов актуальными являются вопросы полного извлечения ценных компонентов и оптимизации технологических процессов экстракции чаги. Для оценки потенциальных полезных ресурсов чаги, а также для технологических расчетов необходимо знание ее средней плотности. В литературных источниках отсутствуют какие-либо достоверные сведения о плотности чаги.

При определении средней плотности тела большое значение играет точность измерения объемных и весовых параметров. Растительное происхождение чаги обуславливает ее сложное строение, пористую структуру и неправильную геометрическую форму. Анализ существующих способов показал, что для определения объема тела неправильной геометрической формы наиболее распространенным является метод вытеснения жидкости. Критический анализ существующих устройств и приборов позволил разработать экспериментальную установку новой оригинальной конструкции для определения объема тел, подтвержденную патентом. Реализация метода вытеснения жидкости в установке позволяет производить измерения объемов тел с погрешностью не более 2 %.

На основе экспериментальных объемных и весовых данных образцов определено значение средней плотности чаги. Распределение средней плотности по телу чаги не равномерное: максимальное значение составило 823 кг/м³, а наименьшее – 328 кг/м³. Анализ распределения средней плотности на контурной плоскости образца показал, что плотность уменьшается от периферии к месту примыкания гриба к стволу дерева. С целью глубокого извлечения ценных компонентов из всей структуры гриба необходимо при оптимизации процесса экстракции чаги учитывать различные зоны гриба, а так же провести дополнительные исследования по определению плотности чаги, позволяющие оценить ее зависимость от содержания различных компонентов, влажности, условий произрастания, времени года, ориентации расположения на дереве и т.д.

Литература

1. Шашкина М.Я., Шашкин П.Н., Сергеев А.В. Химические и медико-биологические свойства чаги // Хим.-фарм. Журн. 2006. Т. 40, № 10. С. 37-44.

2. Duru K., Kovaleva E., Danilova I., Van der Bijl P. [The pharmacological potential and possible molecular mechanisms of action of inonotus obliquus from preclinical studies]. – *Phytotherapy Research*. – 2019. 33:8. – pp. 1966-1980.
3. Wold C., Wangenstein H., Inngjerdingen K., Gerwick W. [Bioactive triterpenoids and water-soluble melanin from inonotus obliquus (chaga) with immunomodulatory activity]. *Journal of functional foods*. – 2020. 71. 104025.
4. Razumov E., Safin R., Mukhametzyanov S., Baigildeeva E., Safina A., Lebedev D. [Studies of the composition of the cryogenic ground chaga]. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. 986:1. 0120293
5. Бурмасова М.А., Сысоева М.А. Экстракция водного извлечения гриба чаги диэтиловым эфиром // Башкирский химический журнал. 2012. Т. 19. № 2. С. 50-52
6. Сафина А.В., Губернаторов В.В., Гараев Р.Р., Разумов Е.Ю. Интенсификация процесса водной экстракции чаги путем периодического понижения давления среды // *Деревообрабатывающая промышленность*. 2017. № 2. С. 50-53.
7. Голованчиков А.Б., Грачева Н.В. Моделирование процесса экстрагирования чаги в электрическом поле // *Естественные и технические науки*. 2011. № 5 (55). С. 381-387
8. Safin R., Mukhametzyanov S., Gubernatorov V. [Water vacuum-oscillating extraction of chaga]. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. 666(1) 012086
9. Разумов Е.Ю., Губернаторов В.В., Сафин Р.Р., Валеев И.А. Анализ качественных показателей сухого экстракта чаги, полученного водно-вакуумной экстракцией // *Деревообрабатывающая промышленность*. 2019. № 1. С. 93-99.
10. Очирова А.С. Плотность и виталитетная структура ценопопуляций *Tulipa biflora pall. (Liliaceae)* в прикаспийской низменности // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2020. Т. 12. № 1. С. 23-33.
11. Полубояринов О. И. Плотность древесины. М.: Лесная промышленность, 1976. 160 с.
12. Sereno A., Silva M., Mayor L. [Determination of particle density and porosity in foods and porous materials with high moisture content]. *International Journal of Food Properties*. 2007. 10:3 4545-49
13. Рыбин Б.М., Завражнова И.А., Рыбин Д.Б. Определение физических показателей лигноуглеводного комплекса древесинного вещества // *Лесной вестник. Forestry Bulletin*. 2018. Т. 22. № 5. С. 94-102.
14. ГОСТ 16483.1-84 (СТ СЭВ 388–76). Древесина. Метод определения плотности. М.: Изд-во стандартов, 1984. - 8 с.
15. Гайнуллин Рен.Х., Цветкова Е.М., Гайнуллин Риш.Х. К вопросу об истинной плотности древесины // *Деревообрабатывающая промышленность*. 2020. № 2. С. 11-20.
16. Уголев Б.Н. Древесиноведение и лесное товароведение. М.: МГУЛ, 2007. – 351 с.
17. Dutta B., Raghavan G., Ngadi M. [Surface characterization and classification of slow and fast pyrolyzed biochar using novel methods of pycnometry and hyperspectral imaging]. *Journal of Wood Chemistry and Technology*. 2012. 32:2. pp. 105-120.
18. Wade J., Martin G., Long D. [An assessment of powder pycnometry as a means of determining granule porosity]. *Pharmaceutical Development and Technology*. 2015. 20:3. pp. 257-265.
19. Semel F., Lados D. [Porosity analysis of PM materials by helium pycnometry]. *Powder Metallurgy*. 2006. 49:2. pp. 173-182.
20. Мухтарова А.Р., Илалова Г.Ф., Разумов Е.Ю., Губернаторов В.В., Саерова К.В. Сравнительный анализ качественных показателей экстрактов грибов чаги, произрастающих на территории Чехии и Западной Сибири // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. 2018. Т. 6. № 3 (39). С. 261 -266.
21. Razumov E., Safin R., Mukhametzyanov S., Hučko B., Martin P., Gomba G., Bazant V. [Influence of development conditions on qualitative indicators of Fungus Chaga.] *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. 666(1). 012084
22. Губернаторов В.В., Гараев Р.Р., Шарычев О.С., Хасаншин Р.Р., Сафина А.В. Экстрагирование чаги с использованием вакуума // В сборнике: *Инновации, качество и сервис в технике и технологиях. Сборник научных трудов 7-ой Международной научно-практической конференции*. – 2017. С. 80-83.
23. Прибор для измерения объема образцов древесины: пат. 651198 СССР № 1694864/29-15 / Магдеев Д.М.; заявл. 06.08.1971; опублик. 05.03.1979, Бюл. № 9.

24. Устройство для измерения объемов образцов древесины: пат. 2741900 Рос. Федерация. № 2020125362 / Гайнуллин Рен.Х., Цветкова Е.М., Гайнуллин Риш.Х.; заявл. 30.07.2020; опубл. 29.01.2021, Бюл. № 4.

©Гайнуллин Ренат Х. – канд. техн. наук, доцент кафедры деревообрабатывающих производств, ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО «ПГТУ»), e-mail: gainullinrh@yandex.ru; Сафина А.В. – канд. техн. наук, доцент кафедры архитектуры и дизайна изделий из древесины, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), e-mail: alb_saf@mail.ru; Цветкова Е.М. – старший преподаватель кафедры стандартизации, сертификации и товароведения ФГБОУ ВО «ПГТУ», e-mail: Ekaterinadudina@mail.ru; Гайнуллин Ришат Х. – канд. техн. наук, доцент кафедры деревообрабатывающих производств, ФГБОУ ВО «ПГТУ», e-mail: rishat_000@mail.ru; Губернаторов В.В. – аспирант кафедры архитектуры и дизайна изделий из древесины, ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: valera_gub@mail.ru.

UDC 531.754; 615.322

EXPERIMENTAL DETERMINATION THE BULK DENSITY OF CHAGA

Renat Kh. Gainullin, A.V. Safina, E.M. Tsvetkova, Rishat Kh. Gainullin, V.V. Gubernatorov

The article presents the results of studies to determine the bulk density of chaga. As a result of a critical analysis of the structures and devices for determining the volume of samples, a new original design of the experimental setup based on the liquid displacement method is proposed. It was found that the measurement error of the volume of porous bodies at this installation is less than 2 %. Samples of dried chaga representing different zones of the mushroom body were examined: the inner one, adjacent to the tree trunk, the surface one, and the fruit body itself. Based on the experimental volume and weight data of the samples, the average density of chaga was determined, which ranges from 328 kg/m³ to 823 kg/m³ in various zones. It was found that the value of the average density decreases from the periphery of the bowl to the place where the mushroom body adjoins the tree trunk. This distribution of average density requires optimization of the chaga extraction process, taking into account the different zones of the fungus

Key words: chaga, bulk density of chaga, density determination methods.

References

1. Shashkina M.Ya., Shashkin P.N., Sergeev A.V. [Chemical and medico-biological properties of chaga] Him-farm. Zhurnal [Chem. - pharm. Journal] – 2006. – Vol. 40 – No. 10. – pp. 37-44. (In Russ.).
2. Duru K., Kovaleva E., Danilova I., Van der Bijl P. [The pharmacological potential and possible molecular mechanisms of action of inonotus obliquus from preclinical studies] Phytotherapy Research.– 2019. – 33:8. pp. 1966-1980.
3. Wold C., Wangenstein H., Inngjerdigen K., Gerwick W. [Bioactive triterpenoids and water-soluble melanin from inonotus obliquus (chaga) with immunomodulatory activity]//Journal of functional foods. – 2020. 71. – 104025.
4. Razumov E., Safin R., Mukhametzyanov S., Baigildeeva E., Safina A., Lebedev D. [Studies of the composition of the cryogenic ground chaga]. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. 986:1. 0120293
5. Burmasova M. A., Sysoeva M. A. [Extraction of water extraction of chaga mushroom with diethyl ether] Bashkirskij himicheskij zhurnal [Bashkir Chemical Journal] – 2012. – Vol. 19. – No. 2. – pp. 50-52. (In Russ.)
6. Safina A.V., Gubernatorov V.V., Garaev R.R., Razumov E. Yu. [Intensification of the process of water extraction of chaga by periodically lowering the pressure of the medium] Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry] – 2017. – No. 2. – pp. 50-53. (In Russ.).
7. Golovanchikov A. B., Gracheva N. V. [Modeling of the chaga extraction process in an electric field] Estestvennye i tekhnicheskie nauki [Natural and technical sciences.] 2011. No. 5 (55). pp. 381-387. (In Russ.)
8. Safin R., Mukhametzyanov S., Gubernatorov V. Water vacuum-oscillating extraction of chaga. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. 666(1) 012086

9. Razumov E. Yu., Gubernatorov V. V., Safin R. R., Valeev I. A. [Analysis of the quality indicators of dry chaga extract obtained by water-vacuum extraction] *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Woodworking industry] 2019. No. 1. pp. 93-99. (In Russ.)
10. Ochirova A. S. Density and vital structure of *Tulipa biflora* pall coenopopulations. (Liliaceae) in the Caspian lowland. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2020. Vol. 12. No. 1. pp. 23-33. (In Russ.)
11. Poluboiarinov O. I. [Wood density]. M.: *Lesnaya promyshlennost'* [M.: Forest industry]. 1976. 160 p. (In Russ.)
12. Sereno A., Silva M., Mayor L. Determination of particle density and porosity in foods and porous materials with high moisture content. *International Journal of Food Properties*. 2007. 10:3 4545-49
13. Rybin B. M., Zavrzhnova I. A., Rybin D. B. [Determination of physical parameters of the lignocarbon complex of wood matter] *Lesnoj zhurnal* [Forestry Bulletin] 2018. Vol. 22. No. 5. pp. 94-102. (In Russ.)
14. GOST 16483.1-84 (ST COMECON 388-76). Wood. Method for determining density. Moscow: Izd-vo standartov, 1984. - 8 p. (In Russ.)
15. Gainullin Ren.Kh., Tsvetkova E.M., Gainullin Rish.Kh. [The study of the real specific gravity of wood] // *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Woodworking industry]. 2020. № 2. P. 11–20. (In Russ.)
16. Ugolev B. N. Wood science and forest commodity science. Moscow: MGUL, 2007. - 351 p. (In Russ.)
17. Dutta B., Raghavan G., Ngadi M. Surface characterization and classification of slow and fast pyrolyzed biochar using novel methods of pycnometry and hyperspectral imaging. *Journal of Wood Chemistry and Technology*. 2012. 32:2. pp.105-120.
18. Wade J., Martin G., Long D. An assessment of powder pycnometry as a means of determining granule porosity. *Pharmaceutical Development and Technology*. 2015. 20:3. pp. 257-265.
19. Semel F., Lados D. Porosity analysis of PM materials by helium pycnometry. *Powder Metallurgy*. 2006. 49:2. pp. 173-182.
20. Mukhtarova A. R., Ilalova G. F., Razumov E. Yu., Gubernatorov V. V., Saerova K. V. [Comparative analysis of qualitative indicators of extracts of chaga mushrooms growing in the Czech Republic and Western Siberia] *Aktualnye napravleniya nauchnyh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice] 2018. Vol. 6. No. 3 (39). pp. 261-266. (In Russ.)
21. Razumov E., Safin R., Mukhametzhanov S., Hučko B., Martin P., Gomba G., Bazant V. Influence of development conditions on qualitative indicators of Fungus Chaga. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. 666(1). 012084
22. Gubernatorov V. V., Garaev R. R., Sharychev O. S., Khasanshin R. R., Safina A.V. [Extraction of chaga using vacuum] *V sbornike: Innovacii, kachestvo i servis v tekhnike i tekhnologiyah. Sbornik-nauchnyh trudov 7-oj Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [In the collection: Innovations, quality and service in engineering and technology. Collection of scientific papers of the 7th International Scientific and Practical Conference] 2017. pp. 80-83. (In Russ.)
23. Magdeev D.M. Pribor dlya izmereniya ob"ema obrazcov drevesiny [Instrument for measuring the volume of wood samples] Patent USSR, no. 651198, 1979.
24. Gainullin Ren.Kh., Tsvetkova E.M., Gainullin Rish.Kh. Ustrojstvo dlya izmereniya ob"emov obrazcov drevesiny [Device for measuring the volume of wood samples] Patent RF, no. 2741900, 2021.

©Gainullin Renat Kh. – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Woodworking Industries, Volga State University of Technology (VSUT), e-mail: gainylinrh@yandex.ru; Safina A.V. – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Architecture and Design of Wood Products, KNRTU, alb_saf@mail.ru; Tsvetkova E.M. – Senior Lecturer of the Department of Standardization, Certification and Merchandising, VSUT, e-mail: Ekaterinadudina@mail.ru; Gainullin Rishat Kh. – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Woodworking Industries, VSUT, e-mail: rishat_000@mail.ru; Gubernatorov V.V. – Postgraduate student of the Department of Architecture and Design of Wood Products, KNRTU, e-mail: valera_gub@mail.ru.

Химическая технология древесины

УДК 674.81

БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОЙ БИОМАССЫ

Р.В. Салимгараева, М.В. Газеев, Ш.Р. Мухаметзянов, Г.Ф. Илалова

Рассмотрены актуальные малоизученные биотехнологические методы переработки отходов растительного происхождения. Представлены результаты анализа зарубежных источников в области исследования биоразложения растительных полимеров, изучения предварительной обработки биомассы в процессах химических производств. Проанализированы современные исследования в области производства биотоплива биотехнологическими методами из различных видов растительного сырья. Установлена актуальность использования для этих целей клубнеплодов различных растений. Изучено производство биопластиков из крахмала сельскохозяйственных отходов с использованием микроорганизмов.

Ключевые слова: биопереработка, растительная биомасса, предварительная обработка, биоделигнификация, биодетоксикация, биоконверсия, деструкция, полигидроксibuтират.

Введение

С момента возникновения цивилизованного общества встала проблема охраны окружающей среды. Из-за промышленной, сельскохозяйственной и бытовой деятельности человека постоянно происходят изменения физических, химических и биологических свойств окружающей среды, причем многие из этих изменений весьма неблагоприятны.

При этом все возрастающее влияние на способы контроля за окружающей средой и на ее состояние оказывают биотехнологические процессы. Хорошим примером такого рода служит внедрение новых, более совершенных методов переработки отходов. Однако этим применение биотехнологии в данной сфере отнюдь не ограничено. Она играет все большую роль в химической промышленности, сельском хозяйстве и помогает хотя бы отчасти решить многие из существующих проблем.

Сегодня быстро развиваются многообразные отрасли промышленности, в которых процессы жизнедеятельности микробов используются для создания замкнутых систем, для контроля за загрязнением сточных вод, для использования альтернативных энергоресурсов и химического сырья в промышленности; эти процессы широко используются и в сельском хозяйстве.

Наиболее распространенные процессы биопереработки растительных отходов, такие как компостирование, силосование, анаэробная ферментация, биомодификация, получение белка одноклеточных организмов, выращивание грибов хорошо изучены и проработаны [1-12]. По этим процессам проведены исследования и эксперименты, предложены технологии производства и переработки.

Цель данной статьи – более полное понимание и применение актуальных, но при этом малоизученных методов биопереработки отходов растительного происхождения (рис. 1).

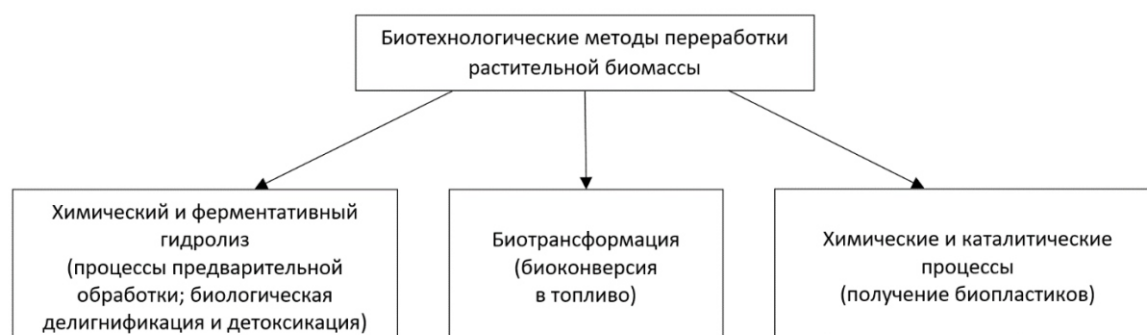


Рис. 1. Условная схема наиболее актуальных методов биопереработки растительной биомассы

Одной из наиболее перспективных развивающихся платформ биопереработки является биохимическая платформа [13]. Биохимическая платформа фокусируется на ферментации сахаров, извлеченных из лигноцеллюлозного сырья. После подготовки сырья (уменьшения размера) технологии конверсии включают три основных этапа: 1) преобразование биомассы в сахар или другое сырье для ферментации; 2) биоконверсия этих промежуточных продуктов биомассы с использованием биокатализаторов; 3) обработка продуктов для получения добавленной стоимости в виде химикатов, топливного этанола и других видов топлива, тепла и / или электроэнергии.

Большая часть растительного вещества находится в форме прочных полимеров, таких как целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин, которые с трудом или совсем не используются животным организмом в качестве питательных веществ [14]. Чтобы улучшить усвояемость компонентов растительного сырья, интенсивно разрабатываются физические, химические и биологические методы разрушения растительных полимеров и конверсии их в более ценные продукты.

Биоразложение полимерных материалов представляет собой очень сложный процесс, который может происходить по-разному. В целом, биodeградация полимерных материалов происходит в два этапа [15, 16]. Первый этап - деполимеризация макромолекул на более короткие цепи. Этот этап обычно происходит вне клеток организма из-за размера полимерной цепи и нерастворимости многих полимеров. Второй шаг соответствует минерализации. Как только образуются олигомерные фрагменты достаточно малого размера, они транспортируются в клетки, где биоассимилируются микроорганизмами, а затем минерализуются [15, 17].

Химический и ферментативный гидролиз

Технологии предварительной обработки биомассы [18-21] (химические, физические или биологические) изменяют / устраняют структурные и композиционные ограничения для улучшения скорости гидролиза и увеличения выхода сбраживаемых сахаров из целлюлозы. Следовательно, их можно разделить на две группы: 1) процессы, связанные с химическими и биохимическими ограничениями, такими как извлечение целлюлозы, усвояемость, образование побочных продуктов; 2) технологии, связанные с затратами на биопроцессы, такими как использование воды и энергоэффективность.

В зависимости от процесса и условий, используемых во время предварительной обработки, сахара гемицеллюлозы могут разлагаться до слабых кислот, производных фурана и фенольных соединений [22]. Эти соединения могут ингибировать более поздний процесс ферментации, что приводит к снижению выхода целевого продукта.

Гидротермальные процессы используют воду, пар или то и другое вместе, а также тепло. Гидротермолиз [23] начинался как метод предварительной обработки перед ферментативным гидролизом. Гидротермальные процессы включают автогидролиз [24-29], водное сжижение [30], водную экстракцию [31], водную предварительную обработку [32, 33], гидротермолиз [34-36], аквазолв [37], гидротермальную предварительную обработку [38], гидролиз [39] и варку [40]. Гидротермальные обработки в основном включают жидкую горячую воду (автогидролиз) и паровой взрыв от 150° до 230° С [41]. При температурах ниже 100° С гидролитический эффект на материал отсутствует [42], тогда как при температуре выше 220° С начинаются процессы разложения [43, 44]. При 240-250° С начинаются реакции пиролиза [45, 46]. Время реакции гидротермальных обработок варьируется от секунд до часов, что зависит от рабочей температуры.

Предварительная щелочная обработка увеличивает усвояемость целлюлозы. В зависимости от используемого катализатора предварительная щелочная обработка может быть разделена на две основные группы: 1) предварительная обработка с использованием гидроксида натрия, калия или кальция; 2) предварительная обработка с использованием аммиака. В отличие от кислотных или гидротермальных процессов, щелочные методы более эффективны для солубилизации лигнина, демонстрируя лишь незначительную солубилизацию целлюлозы и гемицеллюлозы, за исключением перколяционной обработки с рециркуляцией аммиака, которая дает твердые частицы биомассы, в основном содержащие целлюлозу [19, 21, 47].

В работе [48] рассмотрены последние исследования, касающиеся применения различных микроорганизмов или ферментов в качестве полезных и экологически безопасных технологий делигнификации и детоксикации для производства лигноцеллюлозного биотоплива.

Различные микроорганизмы, включая бактерии и грибы, могут быть вовлечены в деградацию лигнина, но только, так называемые "белые гнили", базидиомицеты способны эффективно деполимеризовать и минерализовать лигнин [49, 50]. Эти грибы разработали внеклеточную и неспецифическую окислительную ферментативную систему для деградации лигнина. Этот процесс включает в себя различные ферментативные активности, такие как пероксидазы, оксидазы и редуктазы, а также низкомолекулярные соединения, которые опосредуют действие этих ферментов [50]. Эти грибы и их лигнолитические ферменты, широко используемые в целлюлозно-бумажной промышленности для биопульсации или биообесцвечивания, в настоящее время привлекают большое внимание в качестве альтернативы или дополнительного этапа предварительной обработки к традиционным физико-химическим методам повышения ферментативного осахаривания лигноцеллюлозной биомассы [51].

Предварительная обработка была испытана для производства этанола в лабораторных, экспериментальных и демонстрационных масштабах с широким спектром сырья, включая хвойную древесину [52, 53], лиственные породы [54] и травянистые культуры [55]. Основным недостатком этих предварительных обработок является образование различных ингибирующих соединений, преимущественно производных от деградации лигнина и гемицеллюлозы, которые могут влиять на ферментативный гидролиз, а также на стадии ферментации [56, 57, 58, 59]. Одной из возможностей для устранения растворимых ингибирующих соединений является фильтрация и промывка предварительно обработанного материала. Однако эти процессы включают в себя дополнительные и дорогостоящие этапы, затраты воды и потерю растворимых сахаров. В связи с этим было разработано несколько процессов детоксикации для преодоления этих препятствий и снижения ингибирующего потенциала предварительно обработанных материалов. Некоторые процессы детоксикации могут также потребовать дополнительного оборудования и генерировать другие остаточные побочные продукты. Для этого их необходимо адаптировать к конфигурации процесса и оценить в соответствии с условиями ферментации [60].

Разработка новых стратегий биоделигнификации и биодетоксификации является актуальной проблемой. Использование недорогих материалов для производства ферментов или создания более устойчивых ферментирующих микроорганизмов открывает потенциальные возможности для снижения конечных затрат на производство биотоплива и делает весь процесс более устойчивым.

Учеными из Бразилии [61] представлен биотехнологический процесс производства ксилита, включающий в себя технологии предварительной обработки, получения гемицеллюлозного гидролизата, превращения ксилозы в ксилит и извлечения продукта.

Биотехнологическое производство ксилита является альтернативой химическому процессу. Биотехнологический путь имеет ряд преимуществ по сравнению с химическим [62], например: 1 - нет необходимости в очистке и кристаллизации ксилозы, поскольку это биологически селективный процесс; 2 - более мягкие температуры и давления; 3 - некоторые органические и неорганические примеси гемицеллюлозного гидролизата частично разлагаются или используются микроорганизмами в качестве питательных веществ, что делает очистку ксилита удобной и менее дорогой; 4 - истощение ксилозы и глюкозы во время ферментации способствует очистке ксилита, несмотря на присутствие других загрязняющих сахаров (галактозы и арабинозы).

Биотрансформация

Одним из наиболее актуальных приложений биотехнологических процессов является производство биотоплива. В Индии предложен процесс производства биоэтанола из различных клубней (маниока, батат, картофель, ямс, ароид, сахарная свекла), методы ферментации и микроорганизмы, используемые в процессе ферментации, а также рассмотрены перспективы на будущее [63].

Получение биоэтанола из клубневых культур представляется перспективным из-за доступности, высокого содержания крахмала и экономически эффективной обработки, что делает клубни одними из желательных субстратов среди остальных, таких как лигноцеллюлоза и водорослевая биомасса, которые имеют высокую стоимость обработки и обслуживания. Применение новых биотехнологических методов обработки и производства биоэтанола из различных клубневых культур на практике приводит к крупномасштабному производству биоэтанола. Правительства разных стран поддерживают производство и использование биоэтанола из клубнеплодов в качестве альтернативы нефтяному топливу.

Многостадийная технология переработки агропромышленной биомассы для получения этанола рассмотрена исследователями из Пакистана [64]. Производство этанола из биомассы в основном подразделяется на три этапа: 1 – получение сбраживаемых сахаров; 2 – превращение сбраживаемых сахаров в этанол; 3 – отделение и очистка этанола путем дистилляции [65, 66]. Разница между производством лигноцеллюлозы и крахмального этанола является этап получения сахаров перед ферментацией. Сахарные или крахмалистые культуры нуждаются в измельчении для извлечения сахаров путем экстракции и ферментации, что становится относительно простым процессом, который не требует стадий гидролиза или предварительной обработки для получения сахаров и превращения в этанол [67]. Основными этапами превращения лигноцеллюлозной биомассы являются: 1 - процесс предварительной обработки, который может снизить содержание лигнина и подготовить целлюлозу и гемицеллюлозу для ферментативного гидролиза; 2 - этапы ферментативного гидролиза для расщепления полисахаридов в простые сахара; 3 - конверсия сахаров (гексозы и пентозы) для производства этанола микроорганизмами; 4 - производство этанола из пентозных сахаров.

Химические и каталитические процессы

Материалы на основе пластмассы часто используются в упаковке, и их можно встретить повсеместно как в развитых, так и в развивающихся обществах. В настоящее время большинство используемых упаковочных материалов для пищевых продуктов не разлагаются и создают серьезные экологические проблемы. Поэтому идут активные поиски замены полимеров из нефтехимического сырья биоразлагаемыми пластиками, среди которых особое место занимают полигидроксикарбоксилаты.

Было разработано производство полигидроксикарбоксилата (ПГБ) из крахмала сельскохозяйственных отходов с использованием недавно выделенного штамма *Bacillus aryabhattai* T34-N4 [68]. Этот штамм гидролизует мякоть маниоки и крахмал ствола масличной пальмы и накапливал до 17 мас. % ПГБ от сухой массы клеток. А-амилаза этого штамма, *AmyA* показала высокую активность в присутствии крахмала из мякоти маниоки (69,72 ед.) и крахмала стволов масличной пальмы (70,53 ед.). Высокая экспрессия *amyA* была зарегистрирована в присутствии крахмала мякоти маниоки, тогда как низкая экспрессия была обнаружена в присутствии глюкозы. Эти данные предполагают, что осахаривание крахмала с помощью *amyA* позволяет штамму T34-N4 расти и непосредственно производить ПГБ из отработанных крахмальных материалов, таких как мякоть маниоки и крахмал ствола масличной пальмы, которые могут использоваться в качестве недорогих субстратов.

Была исследована способность *B. aryabhattai* T34-N4 использовать различные источники крахмала. Максимальный сухой вес клеток, 2,31 г/л, был обнаружен, когда в качестве субстрата использовался кукурузный крахмал, за которым следовали крахмал стволов масличной пальмы (1,95 г/л), растворимый крахмал (1,73 г/л) и мякоть кассавы (1,42 г/л). Напротив, максимальное содержание ПГБ, 27% (мас./мас.), было получено с растворимым крахмалом, за которым следовали кукурузный крахмал, крахмал ствола масличной пальмы и мякоть кассавы при 21%, 17% и 8% (мас./мас.) соответственно. Этот результат показывает, что *B. aryabhattai* T34-N4 может продуцировать и накапливать ПГБ на разных уровнях из различных источников крахмала [69]. Дальнейшая оптимизация среды и улучшение стратегии ферментации будут иметь важное значение для улучшения накопления ПГБ из сельскохозяйственных отходов крахмала.

Заключение

Разработка новых биотехнологических методов переработки растительной биомассы является актуальной проблемой. Биодеструкция растительного сырья и побочных продуктов сельского хозяйства и промышленности решает одновременно производственные и природоохранные задачи. Речь идет о достижении двух целей в едином процессе: утилизации и превращении ненужного сырья в полезные продукты. При создании альтернативных источников энергии и экологически чистых продуктов биоперерабатывающие заводы, использующие биомассу в качестве сырья, составят серьезную конкуренцию современной промышленности.

Данная работа выполнялась при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-2246.2020.8).

Литература

1. Иванов Ю., Миронов В. Экологичное животноводство: проблемы и вызовы // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2015. Вып. 87.
2. Пахненко Е.П. Осадки сточных вод и другие нетрадиционные органические удобрения. М., 2015.
3. Биотехнология и микробиология анаэробной переработки органических коммунальных отходов. М., 2016.
4. Прикладнаяэкобиотехнология. М., 2012.
5. Olsen J. Bacterial decimation times in anaerobic digestions of animal slurries // Biological Wastes. 1987. №21.
6. Мерзлая Г.Е. Приготовление и применение вермикомпостов. Оренбург, 2001.
7. Титов И.Н. Дождевые черви. Ч. 1. М., 2012.
8. Титова В.И. К вопросу о возможности использования вермикомпостов на основе осадков сточных вод // Дождевые черви и плодородие почв. Владимир, 2004.
9. Миронов В. Влияние режимов подготовки на агрохимический состав компоста // Вестник ВГУ. 2005. №2.
10. Пат. 2244697 РФ. Устройство для приготовления компостов. Заяв. 17.03.03; Оpubл. 20.01.05, Бюл. №2.
11. Пат. 2352093 РФ. Машина для приготовления компостов. Заяв. 06.07.07; Оpubл. 20.04.09, Бюл. №11.
12. Современные технологии и технические средства удаления, хранения навоза и производства высококачественных органических удобрений. Уральск, 2014.
13. Wright L, Boundy B, Perlack B, Davis S & Saulsbury B, Biomass Energy Data Book [U S Department of Energy (DOE), Oak Ridge, TN] 2006.
14. C. K. S. Pillai. Recent advances in biodegradable polymeric materials. National Institute of Interdisciplinary Science & Technology (formerly Regional Research Laboratory), Thiruvananthapuram 69509, India, 2014. P. 558-566. DOI 10.1179/1743284713Y.0000000472
15. G. L. Luckachan and C. K. S. Pillai: 'Biodegradable polymers – a review on recent trends and emerging perspectives', J. Polym. Environ., 2011, 19, 637–676.
16. R. Chandra and R. Rustgi: 'Biodegradable polymers', Prog. Polym. Sci., 1998, 23, 1273–1335.
17. C. Engineer, J. Parikh and A. Raval: 'Review on Hydrolytic degradation behavior of biodegradable polymers from controlled drug delivery system', Trends Biomater. Artif. Organs, 2011, 25, 79 – 85.
18. Huber G W, Iborra S & Corma A, Synthesis of transportation fuels from biomass: Chemistry, catalysts, and engineering, Chem Rev, 106 (2006) 4044-4098.
19. Hamelinck C N, van Hooijdonk G & Faaij A P C, Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term, Biomass Bioenergy, 28 (2005) 384-410.
20. Mosier N, Wyman C, Dale B, Elander R, Lee Y Y, Holtzapple M & Ladisch M, Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass, Biores Technol, 96(2005) 673-686.
21. Sun Y & Cheng J, Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review, Biores Technol, 83 (2002) 1-11.
22. Larsson S, Palmqvist E, Hahn-Hägerdal B, Tengborg C, Stenberg K, Zacchi G & Nilvebrant N O, The generation offer mentation inhibitors during dilute acid hydrolysis of softwood, Enzyme Microbiol Technol, 24 (1999) 151-159.
23. Bobleter O & Pape G, Method to degrade wood, bark and other plant materials, Aust Pat 263661, 1968.
24. Lora J H & Wayman M, Delignification of hardwoods by autohydrolysis and extraction, Tappi, 61 (1978) 47-50.
25. Carrasco F, Fundamentos del fraccionamiento de la biomassa, Afinidad, 46 (1989) 425-429.
26. Schultz T P & McGinnis G D B C J, Similarities and differences in pretreating woody biomass by steam explosion, wetoxidation, autohydrolysis, and rapid steam hydrolysis/continuous extraction, in Energy from Biomass and Wastes VIII (Lake Buena Vista, Florida, EUA) 1984.
27. Rubio M, Tortosa J F, Quesada J & Gómez D, Fractionation of lignocellulosics. Solubilization of corn stalk hemicelluloses by autohydrolysis in aqueous media, Biomass Bioenergy, 15(1998) 483-491.

28. Tortosa J F, Rubio M & Soler A, Autohidrólisis de tallo de maiz en suspensión acuosa, *Afinidad*, 52 (1995) 305-311.
29. Garrote G, Domínguez H & Parajó J C, Mild autohydrolysis: an environmentally friendly technology for xylooligosaccharide production from wood, *J Chem Technol Biotechnol*, 74 (1999) 1101-1109.
30. Heitz M, Carrasco F, Rubio M, Chauvette G, Chornet E, Jaulin L & Overend R P, Generalized correlations for the aqueous liquefaction of lignocellulosics, *Can J Chem Eng*, 64(1986) 647-650.
31. Saska M & Ozer E, Aqueous extraction of sugarcane bagasse hemicellulose and production of xylose syrup, *Biotechnol Bioeng*, 45 (1995) 517-523.
32. Allen S G, Schulman D, Lichwa J, Antal M J, Laser M & Lynd L R, A comparison between hot liquid water and steam fractionation of corn fiber, *Ind Eng Chem Res*, 40 (2001) 2934-2941.
33. Overend R P & Chornet E, Fractionation of lignocellulosics by steam-aqueous pretreatments, *Phil Trans R Soc Lond*, A321(1987) 523-536.
34. Bonn G, Concina R & Bobleter O, Hydrothermolysis: a new process for the utilization of biomass, *Wood Sci Technol*, 17(1983) 195-202.
35. Hörmeyer H F, Schwald W, Bonn G & Bobleter O, Hydrothermolysis of birch wood as pretreatment for enzymatic saccharification, *Holzforschung*, 42 (1988) 95-98.
36. Walch E, Zemmann A J, Schinner F, Bonn G & Bobleter O, Enzymatic saccharification of hemicellulose obtained from hydrothermally pretreated sugar-cane bagasse and beech bark, *Biores Technol*, 39 (1992) 173-177.
37. Allen S G, Kam L C, Zemmann A J & Antal M J, Fractionation of sugar cane with hot, compressed, liquid water, *Ind Eng Chem Res*, 35 (1996) 2709-2715.
38. Bobleter O, Vidotti R, Zemmann A & Prutsch W, Hydrothermal pretreatment of bagasse and wheat straw, in *Proc fifth E C Conf on Biomass for Energy and Industry*, edited by G Grassi, G Gosse & G dos Santos (Elsevier Applied Science, London, Lisboa) 1989, 31-35.
39. Conner A H, Kinetic modeling of hardwood prehydrolysis. Part I. Xylan removal by water prehydrolysis, *Wood Fiber Sci*, 16 (1984) 268-277.
40. Weil J, Sarikaya A, Rau S L, Goetz J, Ladisch C M, Brewer M, Hendrickson R & Ladisch M R, Pretreatment of yellow poplar sawdust by pressure cooking in water, *Appl Biochem Biotechnol*, 68 (1997) 21-40.
41. Garrote G, Domínguez H & Parajó J C, Hydrothermal processing of lignocellulosic materials, *Holz Als Roh- und Werkstoff*, 57 (1999) 191-202.
42. Abatzoglou N, Chornet E, Belkacemi K & Overend R P, Phenomenological kinetics of complex systems – the development of a generalized severity parameter and its application to lignocellulosics fractionation, *Chem Eng Sci*, 47(1992) 1109-1122.
43. Torres M R, Heitz M, Chauvet G, Chornet E & Overend R P, Conversion and solubilization profiles of a prototype hardwood (*Populus tremuloides*) following aqueous thermomechanical pre-treatment, *Biomass*, 10 (1986) 85-96.
44. Bouchard J, Nguyen T S, Chornet E & Overend R P, Analytical methodology for biomass pretreatment. Part 1: Solid residues, *Biomass*, 23 (1990) 243-261.
45. Brownell H H & Saddler J N, Steam-explosion pretreatment for enzymatic hydrolysis, *Biotechnol Bioeng Symp*, 14 (1984) 55-68.
46. Martínez J M, Reguant J, Montero M A, Montané D, Salvadó J & Farriol X, Hydrolytic pretreatment of softwood and almond shells. Degree of polymerization and enzymatic digestibility of the cellulose fraction, *Ind Eng Chem Res*, 36(1997) 688-696.
47. Wyman C E, Dale B E, Elander R T, Holtzapfel M, Ladisch M R & Lee Y Y, Comparative sugar recovery data from laboratory scale application of leading pretreatment technologies to corn stover, *Biores Technol*, 96 (2005) 2026-2032.
48. Antonio D. Moreno, David Ibarra, Pablo Alvira, Elia Toma's-Pejo', and Mercedes Ballesteros. A review of biological delignification and detoxification methods for lignocellulosic bioethanol production. *Critical Reviews in Biotechnology* Volume 35, 2015 - Issue 3, Pages 342-354. doi.org/10.3109/07388551.2013.878896
49. Isroi, Millati R, Syamsiah S, et al. (2011). Biological pretreatment of lignocelluloses with white-rot fungi and its applications: a review. *BioResources*, 6, 5224–59.
50. Martínez AT, Speranza M, Ruiz-Duenas FJ, et al. (2005). Biodegradation of lignocellulosics: microbial, chemical, and enzymatic aspects of the fungal attack of lignin. *International Microbiol*, 8, 195–204.

51. Ruiz-Duen˜as FJ, Martı´nezAT. (2009). Microbial degradation of lignin: How a bulky recalcitrant polymer is efficiently recycled in nature and how we can take advantage of this. *MicrobialBiotechnol*, 2, 164–77.
52. Cara C, Ruiz E, Ballesteros I, et al. (2006). Enhanced enzymatic hydrolysis of olive tree wood by steam explosion and alkaline peroxide delignification. *ProcBiochem*, 41, 423–9.
53. Monavari S, Bennato A, Galbe M, Zacchi G. (2010). Improved one-step steam pretreatment of SO₂-impregnated softwood with time-dependent temperature profile for ethanol production. *BiotechnolProg*, 26, 1054–60.
54. Oliva JM, Sa´ez F, Ballesteros I, et al. (2003). Effect of lignocellulosic degradation compounds from steam explosion pretreatment on ethanol fermentation by thermotolerant yeast *Kluyveromycesmarxianus*. *ApplBiochemBiotechnol*, 105, 141–53.
55. Ballesteros I, Negro MJ, Oliva JM, et al. (2006). Ethanol production from steam-explosion pretreated wheat straw. *ApplBiochemBiotechnol*, 129, 496–508.
56. Palmqvist E, Hahn-Haˆgerdal B. (2000a). Fermentation of lignocellulosic hydrolysates. I: inhibition and detoxification. *BioresourTechnol*, 74, 17–24.
57. Palmqvist E, Hahn-Haˆgerdal B. (2000b). Fermentation of lignocellulosic hydrolysates. II: inhibitors and mechanism of inhibition. *BioresourTechnol*, 74, 25–33.
58. Klinke HB, Thomsen AB, Ahring BK. (2004). Inhibition of ethanol producing yeast and bacteria by degradation products produced during pretreatment of biomass. *ApplMicrobiolBiotechnol*, 66, 10–26.
59. Panagiotou G, Olsson L. (2007). Effect of compounds released during pre-treatment of wheat straw on microbial growth and enzymatic hydrolysis rates. *BiotechnolBioeng*, 96, 250–8.
60. Parawira W, Tekere M. (2011). Biotechnological strategies to overcome inhibitors in lignocellulose hydrolysates for ethanol production: review. *CritRevBiotechnol*, 31, 20–31.
61. Andr s Felipe Hernández-Pérez, Priscila Vaz de Arruda, LucianeSene, Silvio Silv rio da Silva, Anuj Kumar Chandel& Maria das Gra as de Almeida Felipe (2019): Xylitol bioproduction: state-of-the-art, industrial paradigm shift, and opportunities for integrated biorefineries, *Critical Reviews in Biotechnology*, DOI: 10.1080/07388551.2019.1640658.
62. Canilha L, Rodrigues R, Antunes FAF, et al. Bioconversion of hemicellulose from sugarcane biomass into sustainable products. In: Chandel AK, editor. *Sustainable degradation of lignocellulosic biomass – techniques, applications and commercialization*. London (UnitedKingdom): IntechOpenAccess; 2013; p. 15–45.
63. Hrudayanath Thatoi, Preeti Krishna Dash, Sonali Mohapatra & Manas Ranjan Swain (2014): Bioethanol production from tuber crops using fermentation technology: a review, *International Journal of Sustainable Energy*, DOI: 10.1080/14786451.2014.918616.
64. Zahid Anwar, Muhammad Gulfray, Muhammad Irshad (2014): Agro-industrial lignocellulosic biomass a key to unlock the future bio-energy: A brief review, *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*,doi.org/10.1016/j.jrras.2014.02.003.
65. Asgher, M., Shahid, M., Kamal, S., & Iqbal, H. M. N. (2014). Recent trends and valorization of immobilization strategies and ligninolytic enzymes by industrial biotechnology. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 101, 56–66.
66. Demirbas, A. (2005). Bio-ethanol from cellulosic materials: a renew ablemotor fuel from biomass. *Energy Sources*, 27, 327–337.
67. Icoz, E., Tugrul, M. K., Saral, A., &Icoz, E. (2009). Research on ethanol production and use from sugar beet in Turkey. *Biomass and Bioenergy*, 33, 1–7.
68. Wichittra Bomrungnok, Takamitsu Arai, Tadashi Yoshihashi, Kumar Sudesh, TamaoHatta& Akihiko Kosugi (2019): Direct production of polyhydroxybutyrate from waste starch by newly-isolated *Bacillusaryabhatai* T34-N4, *Environmental Technology*, DOI: 10.1080/09593330.2019.1608314.

© **Салимгараева Р.В.** – канд. техн. наук, доцент кафедры архитектуры и дизайна изделий из древесины, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), e-mail: reginka.danilova@mail.ru; **Газеев М.В.** – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры механической обработки древесины и производственной безопасности, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (ФГБОУ ВО УГЛТУ»), e-mail: gazeev_m@list.ru; **Мухаметзянов Ш.Р.** – канд. техн. наук, доцент кафедры архитектуры и дизайна изделий из древесины, ФГБОУ ВО «КНИТУ»), e-mail: joker775.87@mail.ru; **Илалова Г.Ф.** – аспирант кафедры архитектуры и дизайна изделий из древесины, ФГБОУ ВО «КНИТУ»), e-mail: achtung.guzik@mail.ru.

UDC 674.81

BIOTECHNOLOGICAL METHODS FOR PROCESSING PLANT BIOMASS

R.V. Salimgaraeva, M.V. Gazeev, Sh.R. Mukhametzyanov, G.F. Ilalova

The current little-studied biotechnological methods of processing plant waste are considered. The results of the analysis of foreign sources in the field of research on the biodegradation of plant polymers, the study of pretreatment of biomass in the processes of chemical production are presented. Modern research in the field of biofuel production by biotechnological methods from various types of plant raw materials is analyzed. The urgency of using tubers of various plants for these purposes has been established. The production of bioplastics from agricultural waste starch using microorganisms has been studied.

Key words: bioprocessing, plant biomass, pretreatment, biodelignification, biodegradation, bioconversion, destruction, polyhydroxybutyrate.

References

1. Ivanov Yu., Mironov V. [Sustainable livestock farming: problems and challenges] // Technologies and technical means of mechanized production of crop and livestock products. 2015. No. 87. (In Russ).
2. Pahnenko E.P. [Sewage sludge and other unconventional organic fertilizers]. M., 2015. (In Russ).
3. [Biotechnology and microbiology of anaerobic processing of organic municipal waste]. M., 2016. (In Russ).
4. [Applied Ecobiotechnology]. M., 2012. (In Russ).
5. Olsen J. Bacterial decimation times in anaerobic digestions of animal slurries // Biological Wastes. 1987. №21.
6. Merzlaya G.E. [Preparation and application of vermicompost]. Orenburg, 2001. (In Russ).
7. Titov I.N. [Earthworms]. No. 1. M., 2012. (In Russ).
8. Titova V.I. [On the issue of the possibility of using vermicompost based on sewage sludge] // Earthworms and soil fertility. Vladimir, 2004. (In Russ).
9. Mironov V. [Influence of preparation regimes on the agrochemical composition of compost] // Bulletin VSU. 2005. No.2.
10. Pat. 2244697 RF. Composting device. Application 17.03.03; Published 20.01.05, Bull. №2. (In Russ).
11. Pat. 2352093 RF. Composting machine. Application 06.07.07; Published. 20.04.09, Bull. №11. (In Russ).
12. [Modern technologies and technical means for the removal, storage of manure and the production of high-quality organic fertilizers]. Uralsk, 2014. (In Russ).
13. Wright L, Boundy B, Perlack B, Davis S & Saulsbury B, *Biomass Energy Data Book* [U S Department of Energy (DOE), Oak Ridge, TN] 2006.
14. C. K. S. Pillai. Recent advances in biodegradable polymeric materials. National Institute of Interdisciplinary Science & Technology (formerly Regional Research Laboratory), Thiruvananthapuram 69509, India, 2014. P. 558-566. DOI 10.1179/1743284713Y.0000000472
15. G. L. Luckachan and C. K. S. Pillai: 'Biodegradable polymers – a review on recent trends and emerging perspectives', J. Polym. Environ., 2011, 19, 637–676.
16. R. Chandra and R. Rustgi: 'Biodegradable polymers', Prog. Polym. Sci., 1998, 23, 1273–1335.
17. C. Engineer, J. Parikh and A. Raval: 'Review on Hydrolytic degradation behavior of biodegradable polymers from controlled drug delivery system', Trends Biomater. Artif. Organs, 2011, 25, 79 – 85.
18. Huber G W, Iborra S & Corma A, Synthesis of transportation fuels from biomass: Chemistry, catalysts, and engineering, ChemRev, 106 (2006) 4044-4098.
19. Hamelinck C N, van Hooijdonk G & Faaij A P C, Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term, Biomass Bioenergy, 28 (2005) 384-410.
20. Mosier N, Wyman C, Dale B, Elander R, Lee Y Y, Holtzapple M & Ladisch M, Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass, BioresTechnol, 96(2005) 673-686.
21. Sun Y & Cheng J, Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review, BioresTechnol, 83 (2002) 1-11.

22. Larsson S, Palmqvist E, Hahn-Hägerdal B, Tengborg C, Stenberg K, Zacchi G & Nilvebrant N O, The generation offermentation inhibitors during dilute acid hydrolysis of softwood, *Enzyme Microbiol Technol*, 24 (1999) 151-159.
23. Bobleter O & Pape G, Method to degrade wood, bark and other plant materials, Aust Pat 263661, 1968.
24. Lora J H & Wayman M, Delignification of hardwoods by autohydrolysis and extraction, *Tappi*, 61 (1978) 47-50.
25. Carrasco F, Fundamentos del fraccionamiento de la biomasa, *Afinidad*, 46 (1989) 425-429.
26. Schultz T P & McGinnis G D B C J, Similarities and differences in pretreating woody biomass by steam explosion, wet oxidation, autohydrolysis, and rapid steam hydrolysis/continuous extraction, in *Energy from Biomass and Wastes VIII* (Lake Buena Vista, Florida, EUA) 1984.
27. Rubio M, Tortosa J F, Quesada J & Gómez D, Fractionation of lignocellulosics. Solubilization of corn stalk hemicelluloses by autohydrolysis in aqueous media, *Biomass Bioenergy*, 15 (1998) 483-491.
28. Tortosa J F, Rubio M & Soler A, Autohidrólisis de tallos de maíz en suspensión acuosa, *Afinidad*, 52 (1995) 305-311.
29. Garrote G, Domínguez H & Parajó J C, Mild autohydrolysis: an environmentally friendly technology for xylooligosaccharide production from wood, *J Chem Technol Biotechnol*, 74 (1999) 1101-1109.
30. Heitz M, Carrasco F, Rubio M, Chauvette G, Chornet E, Jaulin L & Overend R P, Generalized correlations for the aqueous liquefaction of lignocellulosics, *Can J Chem Eng*, 64 (1986) 647-650.
31. Saska M & Ozer E, Aqueous extraction of sugarcane bagasse hemicellulose and production of xylose syrup, *Biotechnol Bioeng*, 45 (1995) 517-523.
32. Allen S G, Schulman D, Lichwa J, Antal M J, Laser M & Lynd L R, A comparison between hot liquid water and steam fractionation of corn fiber, *Ind Eng Chem Res*, 40 (2001) 2934-2941.
33. Overend R P & Chornet E, Fractionation of lignocellulosics by steam-aqueous pretreatments, *Phil Trans R Soc Lond*, A321 (1987) 523-536.
34. Bonn G, Concina R & Bobleter O, Hydrothermolysis: a new process for the utilization of biomass, *Wood Sci Technol*, 17 (1983) 195-202.
35. Hörmeyer H F, Schwald W, Bonn G & Bobleter O, Hydrothermolysis of birch wood as pretreatment for enzymatic saccharification, *Holzforschung*, 42 (1988) 95-98.
36. Walch E, Zemmann A J, Schinner F, Bonn G & Bobleter O, Enzymatic saccharification of hemicellulose obtained from hydrothermally pretreated sugar-cane bagasse and beech bark, *Biores Technol*, 39 (1992) 173-177.
37. Allen S G, Kam L C, Zemmann A J & Antal M J, Fractionation of sugar cane with hot, compressed, liquid water, *Ind Eng Chem Res*, 35 (1996) 2709-2715.
38. Bobleter O, Vidotti R, Zemmann A & Prutsch W, Hydrothermal pretreatment of bagasse and wheat straw, in *Proc fifth E C Conf on Biomass for Energy and Industry*, edited by G Grassi, G Gosse & G dos Santos (Elsevier Applied Science, London, Lisboa) 1989, 31-35.
39. Conner A H, Kinetic modeling of hardwood prehydrolysis. Part I. Xylan removal by water prehydrolysis, *Wood Fiber Sci*, 16 (1984) 268-277.
40. Weil J, Sarikaya A, Rau S L, Goetz J, Ladisch C M, Brewer M, Hendrickson R & Ladisch M R, Pretreatment of yellow poplar sawdust by pressure cooking in water, *Appl Biochem Biotechnol*, 68 (1997) 21-40.
41. Garrote G, Domínguez H & Parajó J C, Hydrothermal processing of lignocellulosic materials, *Holz Als Roh- und Werkstoff*, 57 (1999) 191-202.
42. Abatzoglou N, Chornet E, Belkacemi K & Overend R P, Phenomenological kinetics of complex systems – the development of a generalized severity parameter and its application to lignocellulosics fractionation, *Chem Eng Sci*, 47 (1992) 1109-1122.
43. Torres M R, Heitz M, Chauvette G, Chornet E & Overend R P, Conversion and solubilization profiles of a prototype hardwood (*Populus tremuloides*) following aqueous thermomechanical pre-treatment, *Biomass*, 10 (1986) 85-96.
44. Bouchard J, Nguyen T S, Chornet E & Overend R P, Analytical methodology for biomass pretreatment. Part 1: Solid residues, *Biomass*, 23 (1990) 243-261.
45. Brownell H H & Saddler J N, Steam-explosion pretreatment for enzymatic hydrolysis, *Biotechnol Bioeng Symp*, 14 (1984) 55-68.
46. Martínez J M, Reguant J, Montero M A, Montané D, Salvadó J & Farriol X, Hydrolytic pretreatment of softwood and almond shells. Degree of polymerization and enzymatic digestibility of the cellulose fraction, *Ind Eng Chem Res*, 36 (1997) 688-696.

47. Wyman C E, Dale B E, Elander R T, Holtzappl e M, LadischM R & Lee Y Y, Comparative sugar recovery data from laboratory scale application of leading pretreatment technologies to corn stover, *BioresTechnol*, 96 (2005) 2026-2032.
48. Antonio D. Moreno, David Ibarra, Pablo Alvira, Elia Toma's-Pejo', and Mercedes Ballesteros. A review of biological delignification and detoxification methods for lignocellulosic bioethanol production. *Critical Reviews in Biotechnology* Volume 35, 2015 - Issue 3, Pages 342-354. doi.org/10.3109/07388551.2013.878896
49. Isroi, Millati R, Syamsiah S, et al. (2011). Biological pretreatment of lignocelluloses with with-rot fungi and its applications: a review. *BioResources*, 6, 5224–59.
50. Martí'nezAT, Speranza M, Ruiz-Duen~as FJ, et al. (2005). Biodegradation of lignocellulosics: microbiol, chemical, and enzymatic aspects of the fungal attack of lignin. *InternationalMicrobiol*, 8, 195–204.
51. Ruiz-Duen~as FJ, Martí'nezAT. (2009). Microbial degradation of lignin: How a bulky recalcitrant polymer is efficiently recycled in nature and how we can take advantage of this. *MicrobialBiotechnol*, 2, 164–77.
52. Cara C, Ruiz E, Ballesteros I, et al. (2006). Enhanced enzymatic hydrolysis of olive tree wood by steam explosion and alkaline peroxide delignification. *ProcBiochem*, 41, 423–9.
53. Monavari S, Bennato A, Galbe M, Zacchi G. (2010). Improved one-step steam pretreatment of SO₂-impregnated softwood with time-dependent temperature profile for ethanol production. *BiotechnolProg*, 26, 1054–60.
54. Oliva JM, Sa'ez F, Ballesteros I, et al. (2003). Effect of lignocellulosic degradation compounds from steam explosion pretreatment on ethanol fermentation by thermotolerant yeast *Kluyveromycesmarxianus*. *ApplBiochemBiotechnol*, 105, 141–53.
55. Ballesteros I, Negro MJ, Oliva JM, et al. (2006). Ethanol production from steam-explosion pretreated wheat straw. *ApplBiochemBiotechnol*, 129, 496–508.
56. Palmqvist E, Hahn-Ha'gerdal B. (2000a). Fermentation of lignocellulosic hydrolysates. I: inhibition and detoxification. *BioresourTechnol*, 74, 17–24.
57. Palmqvist E, Hahn-Ha'gerdal B. (2000b). Fermentation of lignocellulosic hydrolysates. II: inhibitors and mechanism of inhibition. *BioresourTechnol*, 74, 25–33.
58. Klinke HB, Thomsen AB, Ahring BK. (2004). Inhibition of ethanolproducing yeast and bacteria by degradation products produced during pretreatment of biomass. *ApplMicrobiolBiotechnol*, 66, 10–26.
59. Panagiotou G, Olsson L. (2007). Effect of compounds released during pre-treatment of wheat straw on microbial growth and enzymatic hydrolysis rates. *BiotechnolBioeng*, 96, 250–8.
60. Parawira W, Tekere M. (2011). Biotechnological strategies to overcome inhibitors in lignocellulose hydrolysates for ethanol production: review. *CritRevBiotechnol*, 31, 20–31.
61. Andrés Felipe Hernández-Pérez, Priscila Vaz de Arruda, LucianeSene, Silvio Silvério da Silva, Anuj Kumar Chandel& Maria das Graças de Almeida Felipe (2019): Xylitol bioproduction: state-of-the-art, industrial paradigm shift, and opportunities for integrated biorefineries, *Critical Reviews in Biotechnology*, DOI: 10.1080/07388551.2019.1640658.
62. Canilha L, Rodrigues R, Antunes FAF, et al. Bioconversion of hemi cellulose from sugarcane biomass into sustainable products. In: Chandel AK, editor. *Sustainable degradation of lignocellulosic biomass – techniques, applications and commercialization*. London (UnitedKingdom): IntechOpenAccess; 2013; p. 15–45.
63. Hrudayanath Thatoi, Preeti Krishna Dash, Sonali Mohapatra & Manas Ranjan Swain (2014): Bioethanol production from tuber crops using fermentation technology: a review, *International Journal of Sustainable Energy*, DOI: 10.1080/14786451.2014.918616.
64. Zahid Anwar, Muhammad Gulfray, Muhammad Irshad (2014): Agro-industrial lignocellulosic biomass a key to unlock the future bio-energy: A brief review, *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, doi.org/10.1016/j.jrras.2014.02.003.
65. Asgher, M., Shahid, M., Kamal, S., & Iqbal, H. M. N. (2014). Recent trends and valorization of immobilization strategies and ligninolytic enzymes by industrial biotechnology. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 101, 56-66.
66. Demirbas, A. (2005). Bio-ethanol from cellulosic materials: a renewable motor fuel from biomass. *Energy Sources*, 27, 327-337.
67. Icoz, E., Tugrul, M. K., Saral, A., & Icoz, E. (2009). Research on ethanol production and use from sugar beet in Turkey. *BiomassandBioenergy*, 33, 1-7.

68. Wichittra Bomrungnok, Takamitsu Arai, Tadashi Yoshihashi, Kumar Sudesh, Tamao Hatta & Akihiko Kosugi (2019): Direct production of polyhydroxybutyrate from waste starch by newly-isolated *Bacillus* yabhattai T34-N4, *Environmental Technology*, DOI: 10.1080/09593330.2019.1608314.

© **Salimgaraeva R.V.** – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Architecture and Design of Wood Products, Kazan National Research Technological University (KNRTU), e-mail: reginka.danilova@mail.ru; **Gazeev M.V.** – Grand PhD in Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical woodworking and industrial safety, Ural State Forest Engineering University (USFEU), e-mail: gazeev_m@list.ru; **Mukhametzyanov Sh.R.** – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Architecture and Design of Wood Products, KNRTU, e-mail: joker775.87@mail.ru; **Ialova G.F.** – Post-graduate student of the Department of Architecture and Design of Wood Products, KNRTU, e-mail: achting.guzik@mail.ru.

УДК 674.81

ПОЛУЧЕНИЕ ДРЕВЕСНЫХ ПЛАСТИКОВ БЕЗ СВЯЗУЮЩЕГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЦВЕТИЙ БОРЩЕВИКА СОСНОВСКОГО

В.Г. Бурындин, А.В. Артёмов, А.В. Савиновских, А.Е. Шкуро, А.С. Ершова

*Ранними выполненными работами была показана возможность использования биомассы борщевика Сосновского (*Heracleum Sosnowskyi* Manden) как сырья для получения растительных пластиков без добавления связующих (РП-БС). Целью данной работы являлось исследование физико-механических свойств древесных пластиков без добавления связующих (ДП-БС) на основе комбинированного пресс-сырья: древесных отходов с добавлением соцветий борщевика Сосновского и оценка возможности использования изделий на основе данного материала. Относительно высокое содержание лигнина в соцветиях растения (порядком 20%) дает основание о возможности получения ДП-БС. С использованием метода планирования эксперимента были получены математические зависимости описывающие, полученные результаты экспериментов. На основании полученных математических моделей, были построены графики зависимостей свойств композитов от их состава. По полученным уравнениям регрессии с высокой степенью достоверности с помощью метода нелинейной оптимизации для заданных параметров была подобрана наиболее рациональная рецептура. Оптимальная рецептура композитов подбиралась из условий максимальной твердости и минимального водопоглощения композитов. Был предложен следующий рациональный состав: содержание биомассы из соцветия борщевика Сосновского в пресс-композиции – 10 %; влажность пресс-композиции – 12÷18 %. Для обоснования определенных теоретических условий получения материалов на основе ДП-БС с добавлением соцветия борщевика Сосновского с рациональными физико-механическими свойствами был проведен эксперимент при установленных условиях. Физико-механические свойства, полученного материала на основе ДП-БС при рациональных условиях, показали высокую сходимость с теоретическими показателями. Использование в комбинации древесного и растительного сырья позволяет получать пластик малой плотности с удовлетворительными физико-механическими свойствами. Физико-механические свойства ДП-БС, полученного из пресс-сырья на основе соснового опила и соцветия борщевика Сосновского соответствуют свойствам ДП-БС на основе традиционного пресс-сырья – соснового опила.*

Ключевые слова: древесный пластик, растительные отходы, борщевик Сосновского, утилизация.

Введение

Выполненными ранее работами [1-2] была показана возможность использования борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden) как сырья для получения растительных пластиков без связующего (РП-БС).

Однако, относительно невысокие физико-механические показатели получаемых РП-БС на основе биомассы борщевика Сосновского, инициируют поиск возможных направлений исследований связанных с достижением более высоких показателей физико-механических свойств получаемых материалов.

Интерес представляет возможного совместного использования пресс-сырья для получения древесного пластика без связующего (ДП-БС) [3].

Для получения ДП-БС в основном широко используется отходы древесины хвойных и лиственных пород в виде опила [4-6].

Комбинированное использование древесного и растительного сырья в зависимости от процентного соотношения позволяет получать пластики более «мягких» условиях, например за счет понижения температуры прессования [7].

Интерес представляет использование биомассы соцветий (части побега растения) борщевика Сосновского, т.к. использование основной побеговой части растения имеет иные различные перспективные направления [8-10].

Целью данной работы – являлось получение и исследование физико-механических свойства ДП-БС на основе древесных отходов с добавлением биомассы соцветия борщевика Сосновского и оценка возможности использования изделий на основе данного материала.

Методика проведения экспериментальных исследований

В качестве исходного сырья использовались растительные остатки в виде биомассы соцветий борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden) и древесные опилки сосны Обыкновенной (*Pinus sylvestris*).

Морфологические и химические показатели пресс-сырья представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Морфологические и химические показатели пресс-сырья

№	Сырье	Показатель, %				
		Лигнин	Целлюлоза	Смолянистые вещества	Зольность остатка	Влажность
1	Биомасса соцветий борщевика Сосновского (<i>Heracleum sosnowskyi</i> Manden)	20,3	35,4	3,7	14,01	5,8
2	Древесные опилки сосны Обыкновенной (<i>Pinus sylvestris</i>)	31,4	44,6	5,5	0,19	5,9

По результатам определения морфологического состава исходного пресс-сырья: наибольшее количество лигнина (31,4 %) и содержание целлюлозы (44,6%) характерно для древесного сырья. Наибольшее содержание золы (минеральных веществ) установлено в сырье из соцветий борщевика. Относительно высокое содержание минеральных веществ, скорее всего, характеризуется содержанием диоксида кремния [11].

Для исследования свойств ДП-БС, полученных на основе древесного опила сосны и растительных остатков в виде биомассы соцветий борщевика, для оценки влияния одновременно изменяемых технологических факторов при получении данных материалов, в данной работе был использован двухфакторный эксперимент со звездными точками [12].

Матрица планирования эксперимента с кодированными и натуральными значениями факторов представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Матрица эксперимента

№ опыта	Кодированные значения факторов		Натуральные значения факторов	
	X ₁	X ₂	Z ₁	Z ₂
1	1	1	30	18
2	1	-1	30	12
3	-1	1	10	18
4	-1	-1	10	12
5	+α	0	34,3	15
6	-α	0	5,7	15
7	0	+α	20	19,29
8	0	-α	20	10,71

Области изменения факторов были приняты следующие:

- содержание борщевика в пресс-композиции: 10÷30 %;
- влажность пресс-композиции: 12÷18 %.

Методом горячего прессования в закрытых пресс-формах были образцы ДП-БС в виде дисков диаметром 90 мм и толщиной 2 мм.

Условия прессования:

- давление – 40 МПа;
- температура – 180 °С;
- влажность пресс-сырья – 5..6%;
- фракционный состав пресс-сырья – 0,7 мм.

За выходные параметры были приняты следующие свойства ДП-БС:

- $Y(P)$ - плотность, г/см³;
- $Y(\Pi)$ - прочность при изгибе, МПа;
- $Y(T)$ - твердость, МПа;
- $Y(B)$ – водопоглощение за 24 часа, %;
- $Y(L)$ - разбухание по толщине за 24 часа, %;
- $Y(A)$ - ударная вязкость, кДж/м².

Результаты

Физико-механические свойства образцов ДП-БС на основе соснового опила и биомассы борщевика (среднеарифметические значения) приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Физико-механические показатели ДП-БС на основе соснового опила и биомассы борщевика

№	$Y(P)$	$Y(T)$	$Y(\Pi)$	$Y(B)$	$Y(L)$	$Y(A)$
1	1064	30,8	10,3	53,05	2,8	9,28
2	1068	45,3	10,9	52,6	3,2	8,9
3	1087	32,5	11,1	70,8	4,7	13,6
4	1097	57,6	6,7	60,3	3,34	12,9
5	1098	28,3	8,5	64,05	3,5	12,45
6	1090	71,1	8,2	49,5	2,5	11,82
7	1085	46,8	7,9	61,2	2,5	12,56
8	1135	60,2	9,9	83,5	6,6	11,7

Используя регрессионный анализ, были получены экспериментально-статистические модели зависимости свойств ДП-БС в виде полинома второй степени с линейными и смешанными эффектами факторов с вероятностной оценкой адекватности полученных моделей экспериментальным данным [12]:

$$y = b_0 + b_1 \cdot Z_1 + b_2 \cdot Z_2 + b_3 \cdot Z_1 \cdot Z_2 + b_4 \cdot Z_1^2 + b_5 \cdot Z_2^2,$$

где b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 – коэффициенты уравнения для входных факторов; Z_1, Z_2 – натуральные значения входных факторов.

По результатам выполненного регрессионного анализа были получены адекватные уравнения регрессии с коэффициентами их корреляции:

$$\begin{aligned} Y(P) &= 1182,4 + 0,8 \cdot Z_1 - 6,1 \cdot Z_2 - 0,05 \cdot Z_1 \cdot Z_2 \quad (R^2=1); \\ Y(\Pi) &= -4,7 + 0,7 \cdot Z_1 + 0,9 \cdot Z_2 - 0,04 \cdot Z_1 \cdot Z_2 \quad (R^2=1); \\ Y(T) &= 118,5 + 1,6 \cdot Z_1 - 0,7 \cdot Z_2 + 0,09 \cdot Z_1 \cdot Z_2 \quad (R^2=1); \\ Y(B) &= 64,3 + 1,6 \cdot Z_1 - 0,7 \cdot Z_2 - 0,08 \cdot Z_1 \cdot Z_2 \quad (R^2=1); \\ Y(L) &= 3,5 + 0,24 \cdot Z_1 - 0,03 \cdot Z_2 + 0,015 \cdot Z_1 \cdot Z_2 \quad (R^2=1); \\ Y(A) &= 14,7 + 0,06 \cdot Z_1 - 0,23 \cdot Z_2 - 0,002 \cdot Z_1 \cdot Z_2 \quad (R^2=1). \end{aligned}$$

По полученным уравнениям регрессии были построены поверхности отклика изученных свойств от величины варьируемых факторов, представленные на рисунках 1-2.

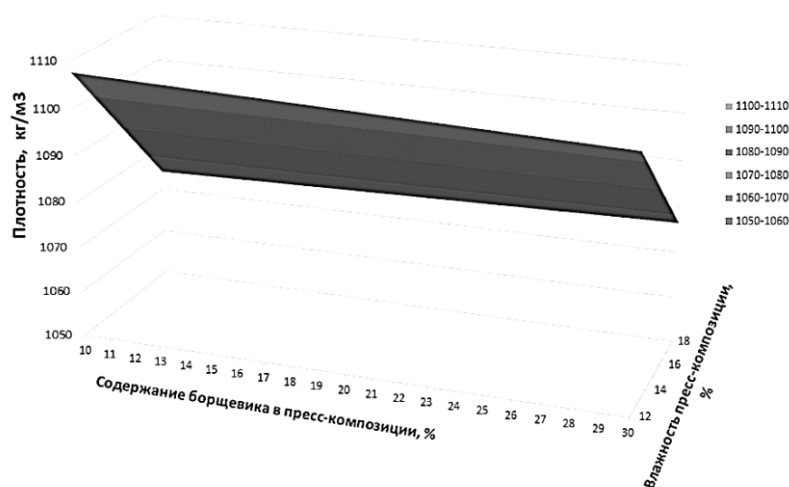


Рис.1. Поверхность зависимости плотности ДП-БС от содержания борцевика и влажности пресс-композиции

Получаемая низкая плотность материала обусловлена в первую очередь влажностью исходного пресс-материала (рис.1). Т.е. при использовании измельченной пресс-массы влажностью выше 16% плотность образцов ДП-БС, а соответственно и их прочность, уменьшается из-за повышения упругости материала.

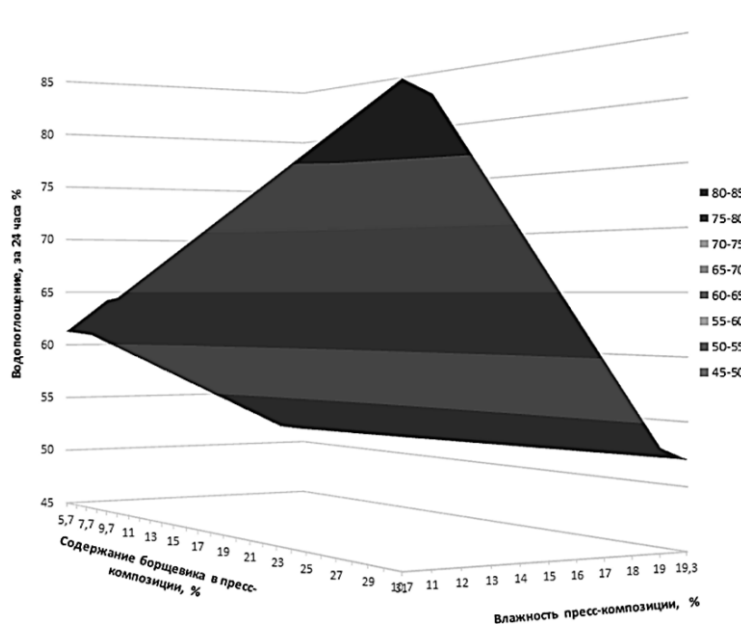


Рис. 2. Поверхность зависимости водопоглощения ДП-БС от содержания борцевика и влажности пресс-композиции

Водопоглощение получаемого материала имеет четко выраженную закономерность (рис.2). С ростом содержания борцевика в пресс-композиции и увеличение влажности пресс-материала, водопоглощение падает. При этом более сильное влияние оказывает именно влажность исходного пресс-сырья.

Это объясняется тем, что в процессе прессования избыточная влага за счет интенсивного испарения приводит к образованию пустот и трещин в прилучаемом материале.

По полученным уравнениям регрессии с высокой степенью достоверности с помощью метода нелинейной оптимизации для заданных параметров была подобрана наиболее рациональная рецептура.

Для нахождения оптимальных рецептур композитов применялась функция «Поиск решения» Microsoft Excel.

При поиске оптимальных условий принимались следующие ограничения: $10 < Z_1 < 30$ и $12 < Z_2 < 18$.

Оптимальная рецептура композитов подбиралась из условий максимальной твердости ($Y(T) \rightarrow \max$) и минимального водопоглощения композитов ($Y(B) \rightarrow \min$).

Была найдена следующая рациональная рецептура ДП-БС на основе соснового опила с добавлением биомассы из соцветий борщевика.

при $Y(T) \rightarrow \max$:

– $Z_1 - 10 \%$;

– $Z_2 - 12 \%$.

при $Y(B) \rightarrow \min$:

– $Z_1 - 10 \%$;

– $Z_2 - 18 \%$.

Результаты испытаний физико-механических показателей по рациональной рецептуре ДП-БС на основе соснового опила с добавлением биомассы из соцветий борщевика приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Физико-механические свойства ДП-БС при рациональных условиях при заданной целевой функции

Физико-механические свойства	Показатели			
	$Y(T) \rightarrow \max$		$Y(B) \rightarrow \min$	
	Расчетные	Экспериментальные	Расчетные	Экспериментальные
Плотность, г/см ³	1108	1091	1074	1026
Прочность при изгибе, МПа	7,4	6,5	10,0	8,3
Твердость, МПа	66	47	52	64
Водопоглощение за 24 часа, %	63	89	53	68

Приведенные результаты показывают хорошую сходимость рассчитанных и экспериментальных данных, что говорит о высокой точности описания экспериментально-статистическими моделями, полученных в результате исследования данных.

Заключение

По результатам выполненной работы можно констатировать следующее:

1. Физико-механические свойства ДП-БС, полученного из пресс-сырья на основе соснового опила с добавлением биомассы из соцветий борщевика Сосновского соответствуют свойствам ДП-БС на основе традиционного пресс-сырья (табл.5).

Таблица 5 – Свойства РП-БС и ДП-БС при использовании различных наполнителей

Физико-механические свойства	РП-БС и ДП-БС		
	на основе		
	биомассы борщевика [1]	соснового опила и биомассы из соцветий борщевика	соснового опила [13]
Плотность, г/см ³	929	1026 ÷ 1091	1272
Прочность при изгибе, МПа	4,5	6,5 ÷ 8,3	7,0
Твердость, МПа	22	47 ÷ 64	25
Водопоглощение, %	78	68 ÷ 89	66

2. Использование комбинации древесного и растительного сырья позволяет получать пластик малой плотности с удовлетворительными физико-механическими свойствами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках научного проекта "FEUG-2020-0013".

Литература

1. Ершова А.С., Савиновских А.В., Артёмов А.В. Исследование физико-механических свойств растительного пластика на основе борщевика Сосновского // Материалы Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) «Химия. Экология. Урбанистика» (Том 4). Издательство ПНИПУ, Пермь, 2020. -с. 61-66.

2. Ершова А.С., Савиновских А.В., Артёмов А.В. Исследование возможности использования борщевика сосновского как сырья для получения растительных пластиков // Всероссийская научно-

практическая конференция студентов и молодых ученых «Современные тенденции развития химической технологии, промышленной экологии и техносферной безопасности» (Часть 1). ВШТЭ СПбГУПТД. - СПб., 2020. – С.75-79.

3. Ершова А.С., Савиновских А.В., Артёмов А.В., Бурындин В.Г. Использование отходов лесопарковых зон для получения пластика без добавления связующих веществ / Леса России и хозяйство в них. - 2019. - № 2 (69). – С. 62-70.

4. Ермолин В.Н., Баяндин М.А., Казицин С.Н., Намятов А.В. Формирование структуры плит малой плотности из гидродинамически активированных мягких отходов деревообработки / Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2019. – № 5 (371). – С. 148-157.

5. Скурыдин Ю.Г., Скурыдина Е.М. Физико-механические характеристики композиционных материалов, получаемых из древесины березы, гидролизованной в присутствии органических кислот / Системы. Методы. Технологии. – 2020. – № 1 (45). – С.113-120.

6. Дедюхин В.Г., Бурындин В.Г., Мухин Н.М., Артёмов А.В. Получение изделий прессованием в закрытых пресс-формах из фенопластов без добавления связующих / Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2005. – № 3. – С.90-94.

7. Савиновских А.В., Артёмов А.В., Бурындин В.Г. Закономерности образования древесных пластиков без добавления связующих с использованием дифференциальной сканирующей калориметрии / Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т.15. – № 3. – С. 37-40.

8. Кузьмин А.М., Водяков В.Н., Радайкина Е.А., Шабарин А.А. Получение и исследование термопластичных композитов с растительным наполнителем / Вестник Технологического университета. - 2020. - Т. 23. - № 7. - С. 40-43.

9. Материалы из нетрадиционных видов волокон: технологии получения, свойства, перспективы применения: монография / Смирнова Е.Г., Лоцманова Е.М., Журавлева Н.М., Резник А.С., Вураско А.В., Дрикер Б.Н., Минакова А.Р., Симонова Е.И., Сиваков В.П., Первова И.Г., Маслакова Т.И., Казаков Я.В., Севастьянова Ю.В., Коптяев В.В., Дернова Е.В., Канарский А.В., Дулькин Д.А., Щербак Н.В., Дубовый В.К. Урал. гос. лесотехн. ун-т, Екатеринбург, 2020. 252 с.

10. Сафин Р.Р., Илалова Г.Ф., Иглепова Ю.В., Сафина А.В., Петров В.И. Обзор зарубежных исследований в области переработки отходов однолетних сельскохозяйственных культур / Деревообрабатывающая промышленность. - 2018. - № 4. - С. 53-60.

11. Шаповалова И.О., Вураско А.В., Петров Л.А., Стоянов О.В. Органо-неорганические гибридные композиты TiO_2/SiO_2 на основе технической целлюлозы из рисовой шелухи / Вестник Технологического университета. - 2016, - Т.19, - №7, - С.17-20.

12. Глухих В.В. Прикладные научные исследования: учебник. Урал. гос. лесотехн. ун-т, Екатеринбург, 2016, 240 с.

13. Савиновских А.В., Артёмов А.В., Бурындин В.Г. Влияние модификаторов на физико-механические свойства древесных пластиков без добавления связующих / Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. – 2016, -Т.20, -№3, - С.55-59.

© **В.Г. Бурындин** – д-р техн. наук, профессор кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров», ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», (ФГБОУ ВО «УГЛТУ»), e-mail: buryndinv@m.usfeu.ru; **Артёмов А.В.** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров, (ФГБОУ ВО «УГЛТУ»), e-mail: artemovav@m.usfeu.ru; **Савиновских А.В.** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров, (ФГБОУ ВО «УГЛТУ»), e-mail: savinovskihav@m.usfeu.ru; **Шкуро А.Е.** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров, (ФГБОУ ВО «УГЛТУ»), e-mail: shkuroae@m.usfeu.ru; **Ершова А.С.** – магистрант кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров», ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: ershovaas@m.usfeu.ru.

UDC 674.81

PRODUCTION OF WOOD PLASTICS WITHOUT BINDER USING INFLORESCENCES OF BORSCHT SOSNOVSKY

V.G. Buryndin, A.V. Artemov, A.V. Savinovskikh, A.E. Shkuro, A.S. Yershova

Early studies have shown the possibility of using the biomass of the Sosnovsky hogweed (Heraculum Sosnowskyi Manden) as a raw material for the production of plant plastics without the addition of binders (RP-BS). The purpose of this work was to study the physical and mechanical properties of wood plastics without the addition of binders (DP-BS) based on a combined press raw material: wood waste with the addition of borscht Sosnovsky inflorescences and to evaluate the possibility of using products based on this material. The relatively high content of lignin b in the inflorescences of the plant (about 20%) suggests the possibility of obtaining DP-BS. Using the experiment planning method, mathematical dependencies describing the experimental results were obtained. Based on the obtained mathematical models, graphs of the dependences of the properties of composites on their composition were constructed. Using the obtained regression equations with a high degree of confidence, the most rational formulation was selected for the given parameters using the nonlinear optimization method. The optimal formulation of the composites was selected from the conditions of maximum hardness and minimum water absorption of the composites. The following rational composition was proposed: the content of biomass from the inflorescence of borscht Sosnowski in the press composition – 10 %; the humidity of the press composition-12-18 %. In order to justify certain theoretical conditions for obtaining materials based on DP-BS with the addition of Sosnovsky hogweed inflorescence with rational physical and mechanical properties, an experiment was conducted under the established conditions. The physical and mechanical properties of the obtained material based on DP-BS under rational conditions showed high convergence with theoretical parameters. The use of wood and vegetable raw materials in combination allows to obtain low-density plastic with satisfactory physical and mechanical properties. The physical and mechanical properties of DP-BS obtained from the press raw materials based on pine sawdust and the inflorescence of the Sosnovsky hogweed correspond to the properties of DP-BS based on the traditional press raw materials-pine sawdust.

Keywords: wood plastic, plant waste, Sosnovsky hogweed, recycling.

References

1. Yershova A. S., Savinovskikh A.V., Artemov A.V. Research of physical and mechanical properties of plant plastic on the basis of Sosnovsky borschevik / / Materials of the All-Russian scientific and practical conference (with international participation) "Chemistry. Ecology. Urbanist " (Volume 4). PNRPU Publishing House, Perm, 2020. - pp. 61-66.
2. Yershova A. S., Savinovskikh A.V., Artemov A.V. Investigation of the possibility of using Sosnovsky borscht as raw materials for obtaining plant plastics / / All-Russian scientific and practical conference of students and young scientists "Modern trends in the development of chemical technology, industrial ecology and technosphere safety" (Part 1). VSHTE SPbGUPTD. - St. Petersburg, 2020. - p. 75-79.
3. Yershova A. S., Savinovskikh A.V., Artemov A.V., Buryndin V. G. Use of forest park zone waste to produce plastics without adding binders / Forests of Russia and agriculture in them.- 2019.- № 2 (69). – P. 62-70.
4. Ermolin V. N., Bayandin M. A., Kazitsin S. N., Namyatov A.V. Formation of the structure of low-density plates from hydrodynamically activated soft waste of woodworking / Izvestiya vysshego uchebnykh zavedeniy. Forest Magazine. – 2019. – № 5 (371). – Pp. 148-157.
5. Skurydin Yu. G., Skurydina E. M. Physical and mechanical characteristics of composite materials obtained from birch wood hydrolyzed in the presence of organic acids. Methods. Technologies. – 2020. – № 1 (45). – P. 113-120.
6. Dedyukhin V. G., Buryndin V. G., Mukhin N. M., Artemov A.V. Obtaining products by pressing in closed molds from phenoplastics without adding binders / Izvestiya vysshego uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal. - 2005. - No. 3. - pp. 90-94.
7. Savinovskikh A.V., Artemov A.V., Buryndin V. G. Regularities of the formation of wood plastics without adding binders using differential scanning calorimetry / Bulletin of the Kazan Technological University. - 2012. - Vol. 15. - No. 3. - pp. 37-40.
8. Kuzmin A.M., Vodiakov V. N., Radaykina E. A., Shabarin A. A. Obtaining and research of thermoplastic composites with vegetable filler / Bulletin of the Technological University. - 2020. - Vol. 23. - No. 7. - p. 40-43.
9. Materials from non-traditional types of fibers: technologies of production, properties, prospects of application: monograph / Smirnova E. G., Lotsmanova E. M., Zhuravleva N. M., Reznik A. S., Vurasko A.V., Driker B. N., Minakova A. R., Simonova E. I., Sivakov V. P., Pervova I. G., Maslakova T. I., Kazakov Ya.V., Sevastyanova Yu. V., Koptyaev V. V., Dernova E. V., Kanarsky A.V., Dulkan D. A., Shcherbak N. V., Dubovy V. K. Ural State Forestry Engineering. un-t, Yekaterinburg, 2020. 252 p.

10. Safin R. R., Ilalova G. F., Iglepova Yu. V., Safina A.V., Petrov V. I. Review of foreign research in the field of waste processing of annual agricultural crops / Woodworking industry. - 2018. - No. 4. - pp. 53-60.
11. Shapovalova I. O., Vurasko A.V., Petrov L. A., Stoyanov O. V. Organo-inorganic hybrid composites TiO₂/SiO₂ based on technical cellulose from rice husks / Bulletin of the Technological University. - 2016, - Vol. 19, - No. 7, - p. 17-20.
12. Glukhikh V. V. Applied scientific research: textbook. Ural State Forest Engineering. un-t, Yekaterinburg, 2016, 240 p.
13. Savinovskikh A.V., Artemov A.V., Buryndin V. G. Influence of modifiers on the physical and mechanical properties of wood plastics without adding binders / Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa-Lesnoy vestnik. - 2016, - Vol. 20, - No. 3, - pp. 55-59.

© **Burundin V.G.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of Technology pulp and paper industries and polymer processing", USFU, e-mail: buryndinv@m.usfeu.ru; **Artyemov A.V.** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technologies for Pulp and Paper Production and Polymer Processing, USFU, e-mail: tom-art@ya.ru; **Savinovskikh A.V.** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technologies for Pulp and Paper Production and Polymer Processing, USFU, e-mail: savinovskihav@m.usfeu.ru; **Shkuro A.E.** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Pulp and Paper Technologies and Polymer Processing, USFU, e-mail: shkuroae@m.usfeu.ru; **Ershova A.S.** – graduate student of the department of Pulp and Paper Technologies and Polymer Processing, USFU, e-mail: ershovaas@m.usfeu.ru.

УДК 502.55

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЦВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДРЕВЕСНО-НАПОЛНЕННЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ PLA

Г.А. Сабирова, Н.Р. Галяветдинов, Р.З. Хайруллин, Ш.Р. Мухаметзянов

Экологическая обеспокоенность многих стран, стремящихся к сохранению природных ресурсов, стимулирует разработки, производство и потребление биоразлагаемых композиционных материалов. Однако в виду их высокой стоимости перспективным является добавление в композиты различных наполнителей, например, древесной муки. Преимуществами использования композитов с древесным наполнителем являются стойкость к атмосферным воздействиям, экологичность, легкость механической обработки, возможность утилизации отходов. С целью улучшения свойств и расширения сфер использования таких композитов возможно применение термомодификации наполнителя, которое придает древесине такие свойства, как: высокая твердость, водостойкость, химическая и биологическая устойчивость. Термическое модифицирование заключается в нагреве древесины в интервале температур от 150 до 230 °С без доступа кислорода. При этом значительно меняются цветовые свойства материала: повышение температуры обработки ведет к заметному потемнению древесины, что приводит к изменению цветовых характеристик конечного композита. В связи с этим для удобства прогнозирования контролирования цвета конечного изделия предложена регрессионная математическая модель, которая получена в результате цветового анализа композитов на основе PLA и базируется на цветовом коде RYB. Предложенная математическая модель, задавая температуру обработки древесного наполнителя, позволяет прогнозировать интенсивности красного, желтого и синего составляющих для последующего визуального представления цвета конечного композитного состава с помощью стандартных компьютерных программ.

Ключевые слова: композитный материал, полилактид, термодревесина, пигмент, цветовая насыщенность, математическое моделирование, колориметрические характеристики и.

Введение

Активное развитие материаловедения привело к появлению новых видов полимерных связующих с повышенными реологическими и прочностными показателями и, как следствие, композиционных материалов на их основе. Создание новых композитов играет ключевую роль в развитии космических,

энергетических, биотехнологических, химических систем, строительстве и других отраслях экономики [1-4].

Как известно, в состав композитных материалов входит два или более компонента, разделенных выраженной границей и различающихся по составу. В таких материалах присутствуют армирующие элементы в виде волокон, нитей или хлопьев более прочного материала.

В качестве компонентов в композитах выступают такие материалы, как: стекло, металл, пластмасса, древесина, керамика. Известны полиматричные многокомпонентные композиционные материалы, когда в одном материале объединяют несколько матриц, или гибридные, включающие в себя различные наполнители [5-9].

Довольно широко распространенным композитным материалом является древесно-полимерный композит (ДПК), в состав которого входят отходы деревообрабатывающей промышленности (опилки, стружка, древесная мука), а также полимер в виде полиэтилена, полипропилена, полистирола или ПВА [10-13]. Одним из главных достоинств данного материала является то, что ДПК на основе термопластов более экологичен, чем древесно-волоконистые и древесно-стружечные плиты на основе фенол-формальдегидных смол.

В связи с экологической обстановкой в мире актуальность приобрели композитные материалы на основе биополимеров, таких как полилактид, полигидроксиалканоаты (PHA), крахмальные смеси, полибутилен адипат/терефталат (PBAT), полибутилен сукцинат (PBS) [14-17].

Ранее в работах [18-22] были проведены исследования по получению древесно-наполненных композитных материалов на основе PLA и древесной муки, подвергнутой предварительной термической модификации при высоких температурах без доступа кислорода.

Предложенный метод предварительного модифицирования древесного наполнителя позволяет исключить газовыделение из древесины в процессе создания композита и, тем самым, предотвратить образование микропор в структуре конечного изделия, что приводит к повышению срока службы изделия за счет повышения прочностных показателей при полном сохранении экологической безопасности [23-26].

Материалы и методы

В результате испытаний была получена цветовая гамма термически модифицированной древесной муки в зависимости от температуры обработки. Компьютерная обработка полученной текстуры термодревесины позволила определить цветовой код по системе кодировки и цвета RYB (табл. 1, серия 1).

Система кодировки цвета RYB – цветовая модель субтрактивного синтеза, описывающая способ кодирования цвета для цветовоспроизведения с помощью трёх основных цветов: R (красный), Y (желтый) и B (голубой/синий).

Образцы композитов серий 2, 3, 4 (табл. 1) были получены следующим образом: в смесительной камере Brabender Plasticorder PLE 331 при температуре 180 °C в течение 10 минут были смешаны гранулы PLA (4043D, NatureWorks), древесная мука (180, сосна) и органические синтетические пигменты желтого (Yellow 1517), рубинового (Red 14571) и синего (Blue 1129) цвета. Далее образцы прессовались на гидравлическом формовочном прессе U7014-H10C при температуре 180 °C в течение 5 минут.

Результаты исследований по смешению компонентов представлены в таблице 1, где в зависимости от температуры обработки древесины показаны полученная цветовая гамма пигментов, древесного наполнителя, композитов и соответствующие им коды в системе RYB.

Таблица 1 – Образцы полученных композитов и соответствующие им коды в системе RYB

Серия		Пигмент (100 %)	PLA (100 %) + пигмент (1 %)	ДМ высушена при 130 °С	ДМ термически обработана при 200 °С	ДМ термически обработана при 240 °С
1	Состав образцов			100 % ДМ		
	Образец					
	Значения RYB			229; 206; 175	121; 95; 70	81; 54; 35
2	Состав композитов			50 % PLA + 49 % ДМ + 1 % Пигмент Yellow 1517		
	Образец композита					
	Значения RYB	251; 212; 57	227; 203; 32	93; 92; 2	47; 51; 0	1; 3; 0
3	Состав композитов			50 % PLA + 49 % ДМ + 1 % Пигмент Red 14571		
	Образец композита					
	Значения RYB	145; 13; 9	109; 1; 1	103; 0; 1	37; 2; 6	36; 1; 5
4	Состав композитов			50 % PLA + 49 % ДМ + 1 % Пигмент Blue 1129		
	Образец композита					
	Значения RYB	66; 96; 208	1; 2; 50	1; 0; 5	1; 1; 1	2; 2; 2

Полученные результаты и их обсуждение

На рисунке 1 представлена графическая зависимость, которая характеризует цвет древесного наполнителя в зависимости от температуры его обработки через изменение интенсивности красного, желтого и синего цветов.

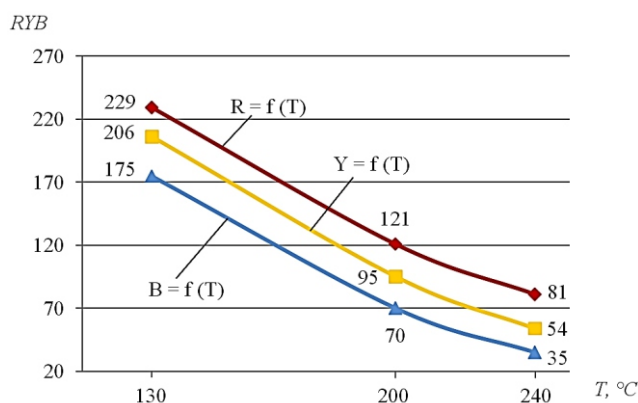


Рис.1. Зависимость составляющих цветовой гаммы древесного наполнителя от его температуры обработки

В результате аппроксимации графических данных были получены аналитические уравнения интенсивности составляющих цветовой гаммы древесного наполнителя в зависимости от температуры его обработки (формула 1, 2, 3).

$$R = -243 \ln T + 1411, \quad (1)$$

$$Y = -249 \ln T + 1420, \quad (2)$$

$$B = -231 \ln T + 1298. \quad (3)$$

Далее были проанализированы цветовые характеристики композиционных материалов, полученных из PLA, пигмента и древесного наполнителя, прошедшего термическую обработку. Результаты анализа показаний красного, желтого и синего цветов полученных композитов представлены на рисунке 2.

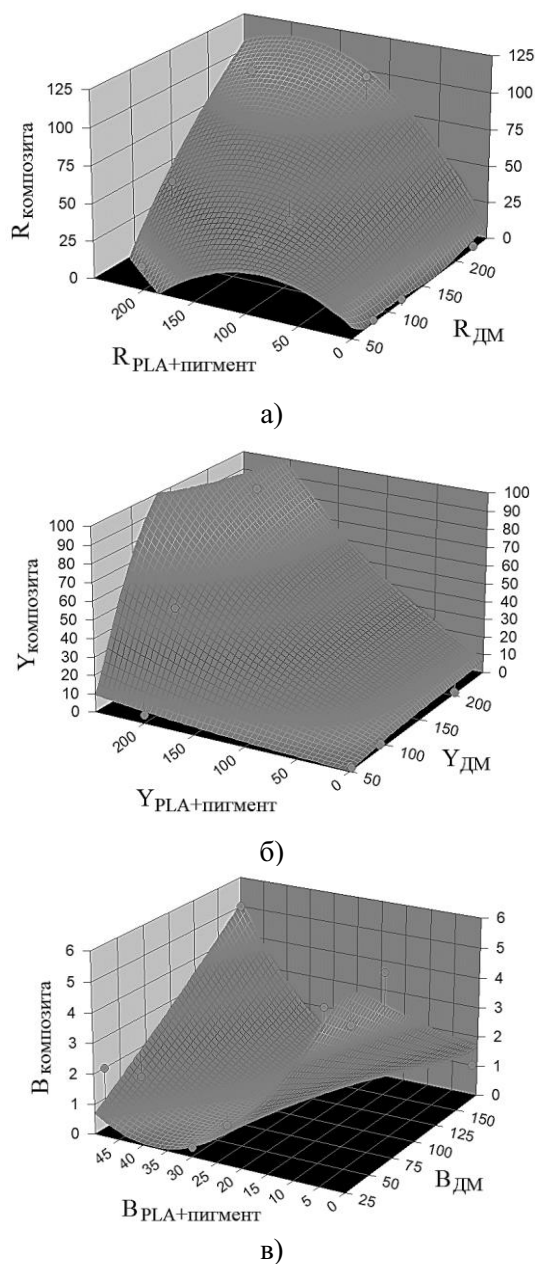


Рис. 2. Изменение составляющих цвета композита в зависимости от уровней интенсивности красного, желтого и синего составляющих в цвете компонентов смеси: а – интенсивность красного цвета; б – интенсивность желтого цвета; в – интенсивность синего цвета

Регрессионный анализ экспериментальных данных, представленных на рис. 2, позволил получить уравнения интенсивности красного, желтого и синего составляющих в цвете композита (формула 4, 5, 6).

$$R_{\text{композита}} = 409.84789 - 176.15016 \ln R_{\text{ДМ}} - 1.0181799 R_{\text{PLA+пигмент}} + 18.750343 (\ln R_{\text{ДМ}})^2 - 0.0028000915 R_{\text{PLA+пигмент}}^2 + 0.3815944 R_{\text{PLA+пигмент}} \ln R_{\text{ДМ}}, \quad (4)$$

$$\ln Y_{\text{композита}} = 1.8791363 - \frac{6918.1291}{R_{\text{ДМ}}^2} + 0.19707475 R_{\text{PLA+пигмент}}^{0.5}, \quad (5)$$

$$B_{\text{композита}} = 7.3687795 - 0.036388354 R_{\text{ДМ}} - 0.36949664 R_{\text{PLA+пигмент}} - 0.48988209 R_{\text{ДМ}}^2 + 0.0044619999 R_{\text{PLA+пигмент}}^2 + 0.0012291832 R_{\text{ДМ}} R_{\text{PLA+пигмент}}. \quad (6)$$

Таким образом, по результатам обработки экспериментальных данных была получена математическая модель, которая позволяет прогнозировать конечную цветовую гамму древесно-наполненного композитного материала на основе PLA и древесного наполнителя в зависимости от температуры предварительной термической модификации последнего.

Заключение

В результате проведенных исследований была получена математическая модель, с помощью которой, задавая температуру обработки древесного наполнителя, можно прогнозировать интенсивности красного, желтого и синего составляющих для последующего визуального представления цвета конечного композитного состава с помощью стандартных компьютерных программ.

Данная работа выполнялась при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-2246.2020.8).

Литература

1. Сабирова Г.А., Мухаметзянов Ш.Р., Саерова К.В. Аддитивное производство – статус и перспективы // Заметки ученого. – 2020. – № 8. – С. 271-274.
2. Сабирова Г.А., Саерова К.В., Ефремов Д.Г., Талипова А.Г., Мосина В.А. Биоразлагаемый пластик и мировой рынок биополимеров 2019-2020 гг. // Инженерные и информационные технологии, экономика и менеджмент в промышленности. Волгоград. – 2020. – С. 9-11.
3. Талипова Г.А., Галяветдинов Н.Р. Разработка биоразлагаемых композиционных материалов из полимера и растительного наполнителя // Актуальные проблемы биологии и экологии. – 2019. – С. 235-240.
4. Сабирова Г.А., Саерова К.В., Ефремов Д.Г. Разработка композитов на основе биоразлагаемых полимеров и наполнителей // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности. Казань. – 2020. – С. 78-79.
5. Галяветдинов Н.Р., Талипова Г.А., Сафин Р.Р., Мухаметзянов Ш.Р. Разработка древесно-наполненного композитного состава для 3D принтеров // Деревообрабатывающая промышленность. Москва. – 2019. – № 1. – С. 33-39.
6. Сабирова Г.А., Галяветдинов Н.Р., Сафин Р.Р. Производство композиционных материалов на основе биоразлагаемых компонентов // Актуальные проблемы лесного комплекса. Брянск. – 2019. – № 55. – С. 181-184.
7. Сабирова Г.А., Саерова К.В., Ефремов Д.Г., Талипова А.Г., Мосина В.А. Применение полисахаридов и целлюлозы для производства биоразлагаемых упаковок // Инженерные и информационные технологии, экономика и менеджмент в промышленности. Волгоград. – 2020. – С. 71-72.
8. Ершова О.В., Мельниченко М.А., Муллина Э.Р. Влияние композиционного состава наполнителя на свойства древесно-полимерного композита // Современные наукоемкие технологии. Магнитогорск. – 2015. – № 10. – С. 29-31.
9. Галяветдинов Н.Р., Талипова Г.А., Саерова К.В., Гизатова М.В., Иглепова Ю.В. Исследования биоразлагаемых композитов из PLA с наполнителем // Современные материалы, техника и технология. Курск. – 2018. – С. 109-112.

10. Safin R.R., Talipova G.A., Galyavetdinov N.R. Design of packaging materials based on polylactide and wood filler // *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*. – 2018. – Т. 7. – № 4.36. – pp. 1089-1091.
11. Ершова О.В., Чупрова Л.В., Муллина Э.Р., Мишурина О.А. Исследование зависимость свойств древесно-полимерных композитов от химического состава матрицы // *Современные проблемы науки и образования*. Магнитогорск. – 2014. – № 2. – С. 26.
12. Chan C.M., Vandi L.-J., Pratt S., Halley P., Richardson D., Werker A., Laycock B. Composites of Wood and Biodegradable Thermoplastics: A Review // *Polymer Reviews*. – 2018. – № 58. – pp. 444-494.
13. Reddy G., Altaf M., Naveena B.J., Venkateshwar M., Kumar E.V. Amylolytic bacterial lactic acid fermentation – A review // *Biotechnology Advances*. – 2008. – № 26. – pp. 22-34.
14. Yaszemski M.J., Payne R.G., Hayes W.C., Langer R., Mikos A.G. Evolution of bone transplantation: molecular, cellular and tissue strategies to engineer human bone // *Biomaterials*. – 1996. – №17. – pp. 268-275.
15. Галяветдинов Н.Р., Сафин Р.Р., Талипова Г.А., Петров В.И. Исследование физико-механических свойств древесно-наполненных композитов на основе полилактида с целью создания биоразлагаемых упаковок // *Деревообрабатывающая промышленность*. Москва. – 2018. – № 4. – С. 12-18.
16. Галяветдинов Н.Р., Сафин Р.Р., Мухтарова А.Р., Илалова Г.Ф., Талипова Г.А. Изучение деструктивных свойств биоразлагаемого древесно-наполненного композита // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. Воронеж. – 2018. – Т. 6. – № 3(39). – С. 174-179.
17. Галяветдинов Н.Р., Сабирова Г.А., Сафин Р.Р., Галиханов М.Ф. Исследование биоразлагаемых древесно-наполненных композиционных материалов на основе полилактида // *Деревообрабатывающая промышленность*. Москва. – 2019. – № 3. – С. 61-68.
18. Safin R.R., Talipova G.A., Galyavetdinov N.R., Nazipova F.V., Salimgaraeva R.V. The study of the destructive properties of wood- filled composites for the production of biodegradable packaging materials // *International Multidisciplinary Scientific Geoconference*. – 2019. – № 19. – pp. 541-546.
19. Sabirova G.A., Safin R.R., Galyavetdinov N.R., Shaikhutdinova A.R. Research of biodegradable wood completed composite materials based on polylactide // *Journal of Physics: Conference Series Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations*. – 2019. – pp. 44117.
20. Галяветдинов Н.Р., Сабирова Г.А., Хайруллин Р.З., Сафин Р.Р., Илалова Г.Ф. Исследование скорости деградации древесно-наполненных PLA композитов в кислых и щелочных растворах // *Деревообрабатывающая промышленность*. Москва. – 2019. – № 4. – С. 62-68.
21. Galyavetdinov N.R., Talipova G.A., Safin R.R. Study of the destructive properties of biodegradable wood-filled composite material // *Materials Science Forum*. – 2020. – Т. 992 MSF. – pp. 290-295.
22. Сабирова Г.А., Галяветдинов Н.Р. Изучение особенностей деструкции композитов из PLA и древесного наполнителя, подвергшихся воздействию щелочных и кислотных сред // *Инновационные материалы и технологии в дизайне*. Санкт-Петербург. – 2020. – С. 37-38.
23. Разумов Е.Ю., Белякова Е.А., Сафин Р.Р. Математическая модель процесса термомодифицирования древесины труднопропитываемых пород в жидкости // *Вестник Казанского технологического университета*. Казань. – 2011. – № 16. – С. 233-239.
24. Сафин Р.Р., Сафин Р.Г., Оладышкина Н.А., Разумов Е.Ю., Хасаншин Р.Р., Кайнов П.А., Кузьмин И.А., Мазохин М.А., Шайхутдинова А.Р., Ахтямова Т.Н., Воронин А.Е. Способ сушки и термической обработки древесины // Патент РФ № 2425305, 2011. Бюл. № 21.
25. Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Разумов Е.Ю. Промышленная установка по термомодифицированию пиломатериалов в среде топочных газов // *Вестник Казанского технологического университета*. Казань. – 2013. – Т. 16. – № 19. – С. 122-124.
26. Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Разумов Е.Ю., Сафин Р.Г., Данилова Р.В., Кайнов П.А., Оладышкина Н.А., Белякова Е.А. Способ термической обработки древесины // Патент РФ № 2453425, 2012. Бюл. № 17.

© **Сабирова Г.А.** – аспирант кафедры архитектуры и дизайна изделий из древесины, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО КНИТУ), e-mail: TalipovaTTT@mail.ru; **Галяветдинов Н.Р.** – канд. тех. наук, доцент кафедры архитектуры и дизайна изделий из древесины, ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: nour777@mail.ru; **Хайруллин Р.З.** – канд. биол. наук, доцент кафедры промышленной безопасности, ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: co1979@yandex.ru; **Мухаметзянов Ш.Р.** – канд. тех.

наук, доцент кафедры архитектуры и дизайна изделий из древесины, ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: joker775.87@mail.ru.

UDC 502.55

MATHEMATICAL MODEL FOR PREDICTING THE COLOR CHARACTERISTICS OF WOOD-FILLED COMPOSITES BASED ON PLA

G.A. Sabirova, N.R. Galyavetdinov, R.Z. Khairullin, Sh.R. Mukhametzyanov

The environmental concerns of many countries seeking to conserve natural resources are driving the development, production and consumption of biodegradable composite materials. However, due to their high cost, it is promising to add various fillers to the composites, for example, wood flour. The advantages of using composites with wood filler are weather resistance, environmental friendliness, ease of mechanical processing, and the possibility of waste disposal. In order to improve the properties and expand the scope of use of such composites, it is possible to use thermal modification of the filler, which gives the wood such properties as: high hardness, water resistance, chemical and biological resistance. Thermal modification consists in heating the wood in the temperature range from 150 to 230 °C without oxygen access. At the same time, the color properties of the material change significantly: an increase in the processing temperature leads to a noticeable darkening of the wood, which leads to a change in the color characteristics of the final composite. In this regard, for the convenience of predicting the control of the color of the final product, a regression mathematical model is proposed, which is obtained as a result of color analysis of PLA-based composites and is based on the RYB color code. The proposed mathematical model, setting the processing temperature of wood filler, allows you to predict the intensity of the red, yellow and blue components for the subsequent visual representation of the color of the final composite composition using standard computer programs.

Keywords: composite material, polylactide, thermal wood, pigment, color saturation, mathematical modeling, colorimetric characteristics.

References

1. Sabirova G. A., Mukhametzyanov Sh. R., Saerova K. V. Additive manufacturing-status and prospects. – 2020. – No. 8. - pp. 271-274. (InRuss.).
2. Sabirova G. A., Saerova K. V., Efremov D. G., Talipova A. G., Mosina V. A. Biodegradable plastic and the world market of biopolymers 2019-2020. // Engineering and information technologies, economics and management in industry. Volgograd. - 2020. - pp. 9-11. (InRuss.).
3. Talipova G. A., Galyavetdinov N. R. Development of biodegradable composite materials from polymer and vegetable filler // Actual problems of biology and ecology. - 2019. - pp. 235-240. (InRuss.).
4. Sabirova G. A., Saerova K. V., Efremov D. G. Development of composites based on biodegradable polymers and fillers // Priority directions of innovative activity in industry. Kazan. - 2020. - pp. 78-79. (InRuss.).
5. Galyavetdinov N. R., Talipova G. A., Safin R. R., Mukhametzyanov Sh. R. Development of wood-filled composite composition for 3D printers // Woodworking industry. Moscow. – 2019. – No. 1. - pp. 33-39. (InRuss.).
6. Sabirova G. A., Galyavetdinov N. R., Safin R. R. Production of composite materials based on biodegradable components // Actual problems of the forest complex. Bryansk. – 2019. – No. 55. - pp. 181-184. (InRuss.).
7. Sabirova G. A., Saerova K. V., Efremov D. G., Talipova A. G., Mosina V. A. Application of polysaccharides and cellulose for the production of biodegradable packaging // Engineering and information technologies, economics and management in industry. Volgograd. - 2020. - pp. 71-72. (InRuss.).
8. Yershova O. V., Melnichenko M. A., Mullina E. R. Influence of the component composition of the filler on the properties of wood-polymer composite // Modern high-tech technologies. Magnitogorsk. – 2015. - No. 10. - pp. 29-31. (InRuss.).
9. Galyavetdinov N. R., Talipova G. A., Saerova K. V., Gizatova M. V., Iglepova Yu. V. Studies of biodegradable composites from PLA with filler // Modern materials, equipment and technology. Kursk. - 2018. - pp. 109-112. (InRuss.).

10. Safin R.R., Talipova G.A., Galyavetdinov N.R. Design of packaging materials based on polylactide and wood filler // *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*. – 2018. – Vol. 7. – No. 4.36. – pp. 1089-1091. (InRuss.).
11. Yershova O. V., Chuprova L. V., Mullina E. R., Mishurina O. A. Investigation of the dependence of the properties of wood-polymer composites on the chemical composition of the matrix // *Modern problems of science and education. Magnitogorsk*. – 2014. – No. 2. – p. 26. (InRuss.).
12. Chan C.M., Vandi L.-J., Pratt S., Halley P., Richardson D., Werker A., Laycock B. Composites of Wood and Biodegradable Thermoplastics: A Review // *Polymer Reviews*. – 2018. – № 58. – pp. 444-494. (InRuss.).
13. Reddy G., Altaf M., Naveena B.J., Venkateshwar M., Kumar E.V. Amylolytic bacterial lactic acid fermentation – A review // *Biotechnology Advances*. – 2008. – № 26. – pp. 22-34. (InRuss.).
14. Yaszemski M.J., Payne R.G., Hayes W.C., Langer R., Mikos A.G. Evolution of bone transplantation: molecular, cellular and tissue strategies to engineer human bone // *Biomaterials*. – 1996. – №17. – pp. 268-275.
15. Galyavetdinov N. R., Safin R. R., Talipova G. A., Petrov V. I. Investigation of the physical and mechanical properties of wood-filled composites based on polylactide for the purpose of creating biodegradable packaging // *Woodworking industry. Moscow*. – 2018. – No. 4. – pp. 12-18. (InRuss.).
16. Galyavetdinov N. R., Safin R. R., Mukhtarova A. R., Ilalova G. F., Talipova G. A. Study of destructive properties of biodegradable wood-filled composite // *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. Voronezh*. – 2018. – Vol. 6. – № 3(39). – pp. 174-179. (InRuss.).
17. Galyavetdinov N. R., Sabirova G. A., Safin R. R., Galikhanov M. F. Investigation of biodegradable wood-filled composite materials based on polylactide // *Woodworking industry. Moscow*. – 2019. – No. 3. – pp. 61-68. (InRuss.).
18. Safin R. R., Talipova G. A., Galyavetdinov N. R., Nazipova F. V., Salimgaraeva R. V. The study of the destructive properties of wood - filled composites for the production of biodegradable packaging materials // *International Multidisciplinary Scientific Geoconference*. – 2019. – № 19. – pp. 541-546. (InRuss.).
19. Sabirova G.A., Safin R.R., Galyavetdinov N.R., Shaikhutdinova A.R. Research of biodegradable wood completed composite materials based on polylactide // *Journal of Physics: Conference Series Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations*. – 2019. – pp. 44117.
20. Galyavetdinov N. R., Sabirova G. A., Khairullin R. Z., Safin R. R., Ilalova G. F. Investigation of the degradation rate of wood-filled PLA composites in acidic and alkaline solutions // *Woodworking industry. Moscow*. – 2019. – No. 4. – pp. 62-68. (InRuss.).
21. Galyavetdinov N.R., Talipova G.A., Safin R.R. Study of the destructive properties of biodegradable wood-filled composite material // *Materials Science Forum*. – 2020. – T. 992 MSF. – pp. 290-295. (InRuss.).
22. Sabirova G. A., Galyavetdinov N. R. Studying the features of the destruction of composites from PLA and wood filler exposed to alkaline and acidic media // *Innovative materials and technologies in design. St. Petersburg*. – 2020. – pp. 37-38. (InRuss.).
23. Razumov E. Yu., Belyakova E. A., Safin R. R. Mathematical model of the process of thermomodification of hard-to-feed wood in liquid // *Bulletin of the Kazan Technological University. Kaza n*. – 2011. – No. 16. – pp. 233-239. (InRuss.).
24. Safin R. R. Safin R. G., Oladyshkin N. A., Razumov E. Y., Khasanshin R. R., Kaynov P. A., Kuzmin, I. A., Matchin M. A., A. R. Shaikhutdinova, Akhtyamova T. N., Voronin A. E. the drying Method and the heat treatment of wood // *Patent RF № 2425305, 2011. Bull. No. 21*. (InRuss.).
25. Safin R. R., Khasanshin R. R., Razumov E. Yu. Promyshlennaya ustanovka po termomodifitsirovaniyu pilomaterialov v srede topochnykh gaz [Industrial installation for thermomodification of sawn timber in the environment of furnace gases]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. Kazan*. – 2013. – T. 16. – No. 19. – pp. 122-124. (InRuss.).
26. Safin R. R. Khasanshin R. R., Razumov E. Y. Safin R. G., Danilova, R. V., Kaynov P. A., Oladyshkin N. A., Belyakova E. A. Method of heat treatment of wood // *Patent RF № 2453425, 2012. Bull. No. 17*. (InRuss.).

© **Sabirova G.A.** – Post-graduate student of the Department of Architecture and Design of Wood Products, Kazan National Research Technological University (KNRTU), e-mail: TalipovaTTT@mail.ru; **Galyavetdinov N.R.** –PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Architecture and Design of Wood Products, KNITU, e-mail: nour777@mail.ru; **Khayrullin R.Z.** –PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Safety, KNRTU, e-mail: co1979@yandex.ru; **Mukhametzyanov Sh. R.** – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Architecture and design of wood products, KNRTU, e-mail:joker775.87@mail.ru.

УДК 678

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИУРЕТАНА И ШЕЛУХИ ОВСА

Д.Д. Чирков, А.Д. Кудрявцев, П.С. Захаров, А.Е. Шкуро, В.В. Глухих, О.Ф. Шишлов

В работе рассматриваются вопросы получения композиционного материала на основе литьевого полиуретана и измельченной до состояния муки шелухи овса, а так же определение показателей физико-механических свойств полученных композитов и установление закономерностей влияния содержания наполнителя в материале на его свойства. Для полученных образцов наполненных полиуретанов были определены показатели следующих физико-механических свойств: плотность, твердость по Бринеллю, контактный модуль упругости при сжатии, пластичность, число упругости, ударная вязкость, предел прочности при изгибе, водопоглощение за 24 часа и водопоглощение за 30 суток. Установлены зависимости между содержанием в образцах муки шелухи овса и их физико-механическими свойствами. Данные зависимости приведены в виде полиномов второй степени.

Ключевые слова: полиуретан, композит, шелуха овса, физико-механические свойства

Введение

Одним из перспективных видов наполнителей для полимерных композиционных материалов являются отходы аграрного происхождения [1]. При производстве и переработке сельскохозяйственной растительной продукции образуется широкий спектр отходов, различных по строению, химическому составу, технологическим свойствам, размерам, форме частиц и другим признакам. Перспективным представляется использование волокон растительного происхождения растений использовать в качестве армирующих наполнителей для полимерных композитов с термопластичной полимерной матрицей [2-5]. Сырьё для получения натуральных волокон является возобновляемым ресурсом, его запасы в мире велики (таблица 1).

Таблица 1 – Источники натуральных волокон

Источники волокна	Масса, тонн (абс. сухого волокна)
Древесина	1 750 000 000
Солома (Пшеница, рожь, рис, овес, и др.)	1 145 000 000
Стебли (кукуруза, хлопок, сорго)	970 000 000
Багасса сахарного тростника	75 000 000
Тростники	30 000 000
Бамбук	30 000 000
Хлопок	15 000 000
Ядровые волокна (джут, пенька, кенаф)	8 000 000
Папирус	5 000 000
Луб (джут, кенаф, пенька)	2 900 000
Хлопковый пух	1 000 000
Трава Esparato	500 000
Листья (ананас, сизаль, генеген, абака)	700 000
Трава Sabai	200 000
Итого	4 033 300 000

Натуральные волокна различного происхождения имеют свои достоинства и недостатки. К числу их достоинств относится их высокая механическая прочность. К недостаткам относятся такие качества, как, высокое водопоглощение влаги и набухание при контакте с водой. Существуют специфические особенности, характерные для растительных волокон аграрного происхождения. Так, льняное волокно склонно к повышенному абразивному износу, что резко ухудшает его технологические и эксплуатационные свойства. У длинного целлюлозного волокна высокого качества недостатком является цена, превышающая цену древесной муки более чем в 10 раз.

Наиболее хорошо изучено и представлено в публикациях многих авторов получение и свойства полимерных композитов с шелухой риса. По химическому составу шелуха риса сходна с древесиной. В ней содержится от 28% до 48% целлюлозы, от 12% до 16% лигнина, от 23% до 28% гемицеллюлоз. При

этом в отличие от древесины рисовая шелуха может содержать до 19 % кремнезема. В ряде стран, выращивающих рис, организовано и функционирует промышленное производство композитов с измельченной рисовой шелухой. Сырьё и изделия из шелухи риса обладают значительно более высокой устойчивостью к микробному разрушению и меньшим влагопоглощением по сравнению с древесной мукой и материалами на её основе. Так, даже измельченная рисовая шелуха поглощает не более 10% влаги. Это связано с отличием химического строения лигнина риса от лигнина древесины, а также с высокой минерализацией рисовой шелухи. Но большое количество кремнезема в составе шелухи риса придаёт сырью абразивные свойства, что можно отнести к недостаткам данного вида сырья [2].

Экономические причины сильно ограничивают применение полимерных композитов на основе натуральных растительных волокон – такие материалы находят применение, в основном, в автомобильной промышленности. Чаще всего в промышленности применяются разнообразные частицы кустарников, однолетних растений, плодов, травы, морских водорослей. В литературе имеется большое число работ по получению композитов с термопластичной полимерной матрицей и с наполнителями из муки морских водорослей, кожуры бананов, скорлупы грецкого ореха, листьев ананасового дерева и других видов пальм, отходов чая и др. [6-11].

Волокнистые и дисперсные наполнители аграрного происхождения являются ежегодно возобновляемым сырьём и могут стать альтернативой древесной в производстве полимерных композиционных материалов. Малоизученным и перспективным направлением является получение и исследование композиционных материалов на основе литьевых полиуретанов и шелухи таких зерновых культур, как овёс, пшеница, гречиха, просо, являющихся крупнотоннажными отходами аграрной отрасли.

В работе [12] были исследованы физико-химические характеристики целлюлозных волокон пресноводных водорослей родов *Cladophora* и *Microspora* и возможности их использования в качестве армирующего наполнителя для пенополиуретана (ППУ). Морфологические, физико-химические и механические свойства полученных композитов были исследованы с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), ИК-спектроскопии, термогравиметрического анализа (ТГА), дифрактометрического анализа и др. В результате исследований было установлено, что использование водорослевой целлюлозы в композициях с полиуретановыми матрицами приводит к увеличению плотности материала значительному уменьшению размера ячеек пенопласта. Использование биомассы водорослей в концентрации 0,5 % и водорослевой целлюлозы в концентрации 1,0% в качестве наполнителя в полиуретановых композитах повысило их жесткость. При повышении содержания биомассы водорослей в образцах композита наблюдается снижение модуля упругости при сжатии. Полученные данные свидетельствуют о том, что водоросли и водорослевая целлюлоза, введенные в состав пенополиуретана, могут быть интегрированы в структуру пены, что приведет к образованию более открытых ячеек и более мягкой пене. Композиционный материал на основе ППУ и биомассы водорослей показал большую амортизирующую способность по сравнению в ненаполненном пенополиуретаном, на основании чего он может быть рекомендован к использованию в упаковочной промышленности.

В исследовании [13] рассматриваются вопросы, связанные с получением сорбентов из отходов сельского хозяйства. Была предложено использование биокомпозитов на основе полиуретанов, армированных пальмовым листом, для сорбции дизельного топлива. Биокомпозиты получали путем смешивания полиола с форполимером в соотношении 1:1 и наполнения матрицы измельченным пальмовым листом в количестве от 5 до 20 мас. % с размерами частиц от 28 до 35 меш. Результаты испытаний показали, что биокомпозиты обладают большей емкостью и лучшей сорбционной эффективностью по сравнению с чистым полиуретаном. Кроме того, на сорбционные свойства композитов напрямую влияет содержание в них волокон и их размеры. Биокомпозиты с высоким содержанием волокон большего размера (28 меш) отличаются высокой сорбционной емкостью (10,02 г/г) и высокой эффективностью сорбции (24,1 %). Установлено, что волокна с разным размером частиц (28 и 35 меш) в биокомпозитах демонстрируют линейную связь между эффективностью сорбции, временем сорбции и фракционными размерами волокон. Кроме того, полученные в ходе работы биокомпозиты демонстрировали работоспособность и эффективность даже после пяти циклов повторного использования, сохраняя требуемую гидрофобность.

В статье [14] было исследовано влияние предварительной щелочной обработки лигноцеллюлозного наполнителя на свойства композитов из натурального каучука/термопластичного полиуретана (ТПУ) и волокон кенафа. Установлено, что по физико-механическим свойствам лучшие результаты

демонстрируют композиты с наивысшим содержанием каучука, что указывает на хорошую адгезию между ним и волокнами кенафа. Полимерные композиты с наибольшим количеством ТПУ демонстрируют самые высокие демпфирующие свойства при высокой температуре. Предварительная щелочная обработка волокон кенафа приводит к снижению показателей водопоглощения и набухания по толщине благодаря хорошему межфазному взаимодействию между волокном и полимерными матрицами. Авторы предполагают, что повышенная адгезия матрицы к наполнителю объясняется увеличением количества водородных связей между ними.

Перспективным направлением исследований является изучение литевых полиуретанов, наполненных измельченными отходами сельского и лесного хозяйства. При создании данных материалов предлагается использовать материалы растительного происхождения, такие как древесная мука и различные измельченные отходы лесного и аграрного хозяйства. Эти наполнители имеют широкую сырьевую базу и низкую стоимость. Ввод выше перечисленных материалов в полиуретаны резко снижает цену готовой продукции. Что при сохранении эксплуатационных свойств материала на достаточном уровне обеспечивает высокий спрос и конкурентоспособность на рынке полимерных композиционных материалов. Целью настоящей работы являлось получение и исследование свойств серии образцов полиуретана, с различными степенями наполнения мукой шелухи овса. В задачи исследования входило определение показателей физико-механических свойств образцов наполненных полиуретанов, а так же установление зависимостей между свойствами материала и содержанием в нем наполнителя.

Методы и материалы

В качестве связующих для создания композиционных материалов, были использованы полиуретан (ПУ) марки Noacast 234 (ООО Композит Строй г. Москва). Полиуретан марки Noacast 234 является двухкомпонентным полиуретаном. Рекомендованное соотношения компонентов А и В составляет 100:60. При увеличении содержания компонента А продукт полимеризации становится более пластичным и гибким. Полиуретан марки Noacast 234 способен к полимеризации при комнатной температуре. В качестве наполнителя использовалась мука шелухи овса (ОМ) марки 250, предоставлена ООО «Композит-основа» (Волгоградская область). Рецептуры полученных композитов представлены в таблице 1.

Таблица 2 – Рецептуры полученных композитов

№	Условное обозначение	Содержание компонента, %		
		ОМ-250	Полиуретан	
			Компонент А	Компонент Б
1	ПУ	0	62,5	37,5
2	ПУОМ-10	10	56,3	33,7
3	ПУОМ-20	20	50	30
4	ПУОМ-30	30	43,7	23,3
5	ПУОМ-40	40	37,5	22,5

Образцы композитов изготавливались следующим образом: компонент А совмещался с наполнителем согласно представленной рецептуре, затем после тщательного перемешивания, в композицию добавляли компонент Б (отвердитель). После интенсивного перемешивания композиция выкладывалась в форму с размерами 100×100×5 мм. Композиция отверждалась при комнатной температуре в течение 24 часов. После полного отверждения композит извлекался из формы и из него изготавливались стандартные образцы для испытаний физико-механических свойств.

Для полученных образцов полиуретанов были определены показатели следующих физико-механических свойств: плотность, твердость по Бринеллю, модуль упругости при сжатии, пластичность, число упругости, ударная вязкость, предел прочности при изгибе, водопоглощение за 24 часа и водопоглощение за 30 суток.

Результаты

Средние арифметические значения физико-механических свойств образцов полученных древеснонаполненных полиуретанов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Свойства образцов древеснонаполненных полиуретанов

Наименование показателя	Композит				
	ПУ	ПУОМ-10	ПУОМ-20	ПУОМ-30	ПУОМ-40
Плотность, кг/м ³	1030,6	904,1	814,6	823,0	982,9
Твердость по Бринеллю, МПа	90,7	69,1	34,8	29,5	27,6
Модуль упругости при сжатии, МПа	1006	873	393	318	292
Число упругости, %	98,0	59,8	52,1	42,4	38,3
Пластичность, %	2,0	34,3	47,9	57,6	61,7
Прочность при растяжении, МПа	53,2	44,7	23,6	20,2	19,0
Прочность при изгибе, МПа	49,5	24,8	17,4	15,9	12,0
Ударная вязкость, кДж/м ²	5,9	2,7	2,3	2,0	1,7
Водопоглощение за 24 часа, %	0,2	2,0	2,8	7,3	8,6
Водопоглощение за 30 суток, %	0,8	4,9	17,5	28,3	35,5

Методом регрессионного анализа с помощью программы Excel [15] были получены в группе полиномиальных уравнений второго порядка для доверительной вероятности 0,95 экспериментально-статистические зависимости этих свойств (Y_i) от содержания в композитах муки шелухи овса (x). Статистические параметры наиболее достоверных зависимостей приведены в таблице 4. При выборе вида регрессионной зависимости свойства композитов от содержания в нём наполнителя в качестве приоритетного критерия её достоверности (адекватности экспериментальным данным) был принят статистический параметр «Значение F».

Таблица 4 – Экспериментально-статистические зависимости свойств композитов от содержания в них ОМ-250

Свойство	Регрессионная зависимость Y_i	Статистические параметры зависимости Y_i		
		Значимость F	Коэффициент детерминации R^2	Стандартная ошибка
Плотность, кг/м ³ (Y_1)	$Y_1 = 1042,2 - 20,93x + 0,48x^2$	0,04	0,96	25,6 кг/м ³
Твердость по Бринеллю, МПа (Y_2)	$Y_2 = 93,27 - 3,61x + 0,05x^2$	0,03	0,97	6,3 МПа
Модуль упругости при сжатии, МПа (Y_3)	$Y_3 = 1061,38 - 37,53x + 0,44x^2$	0,07	0,93	128,8 МПа
Число упругости, % (Y_4)	$Y_4 = 94,94 - 3,26x + 0,05x^2$	0,04	0,96	6,5 %
Пластичность, % (Y_5)	$Y_5 = 3,55 + 3,15x - 0,04x^2$	0,01	0,99	3,2 %
Прочность при растяжении, МПа (Y_6)	$Y_6 = 55,33 - 1,85x + 0,02x^2$	0,05	0,95	5,1 МПа
Прочность при изгибе, МПа (Y_7)	$Y_7 = 47,5 - 2,2x - 0,03x^2$	0,05	0,96	4,4 МПа
Ударная вязкость, кДж/м ² (Y_8)	$Y_8 = 5,58 - 0,26x + 0,004x^2$	0,08	0,92	0,4 кДж/м ²
Водопоглощение за 24 часа, % (Y_9)	$Y_9 = 0,15 + 0,15x + 0,002x^2$	0,05	0,95	1,1 %
Водопоглощение за 30 суток, % (Y_{10})	$Y_{10} = -0,53 + 0,8x + 0,003x^2$	0,02	0,98	2,8 %

Плотность образцов композиционных материалов снижается (рисунок 1) с увеличением содержания в них муки шелухи овса от 0 до 21,8 мас. % (ОМ). При дальнейшем увеличении содержания наполнителя в составе композита наблюдается рост плотности материала.

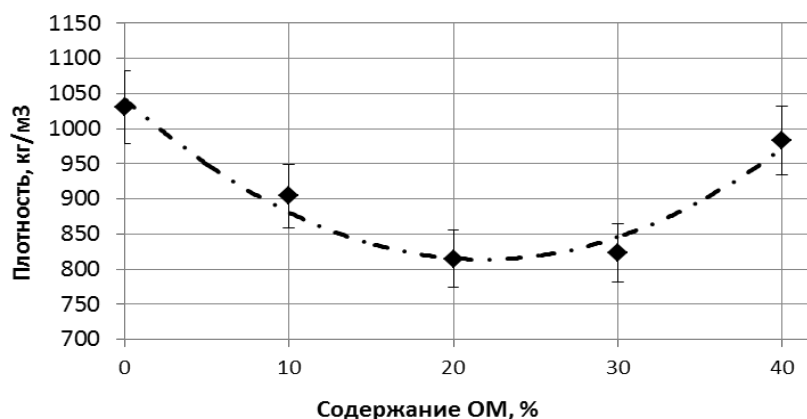


Рис. 1. График зависимости плотности наполненных полиуретанов от содержания наполнителя

Показатели твердости по Бринеллю, контактного модуля упругости при сжатии, и числа упругости так же снижаются пропорционально возрастанию содержания наполнителя в составе композиционного материала (рисунок 2). Снижение этих показателей для наполненных полиуретанов, с нашей точки зрения объясняется более низкой степенью полимеризации полиуретановой полимерной матрицы композита. Что в свою очередь объясняется стерическим эффектом частиц наполнителя, препятствующих взаимодействию молекул изоцианатных и гидроксилсодержащих компонентов. Обратная тенденция характерна для показателя пластичности образцов наполненных полиуретанов.

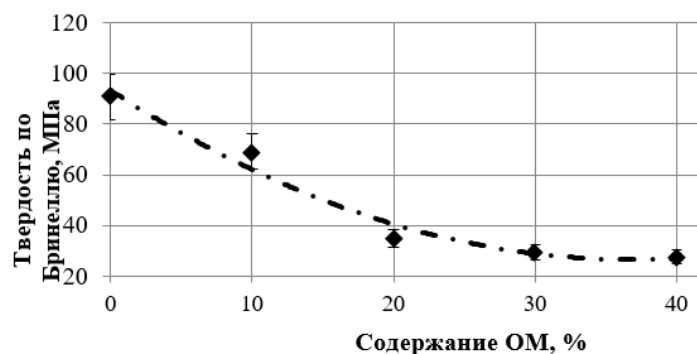


Рис. 2. График зависимости твердости наполненных полиуретанов от содержания наполнителя

Введение в состав двухкомпонентного полиуретана волокон измельченной шелухи овса так же приводит к снижению показателей предела прочности при изгибе (рисунок 3), предела прочности при растяжении и ударной вязкости.

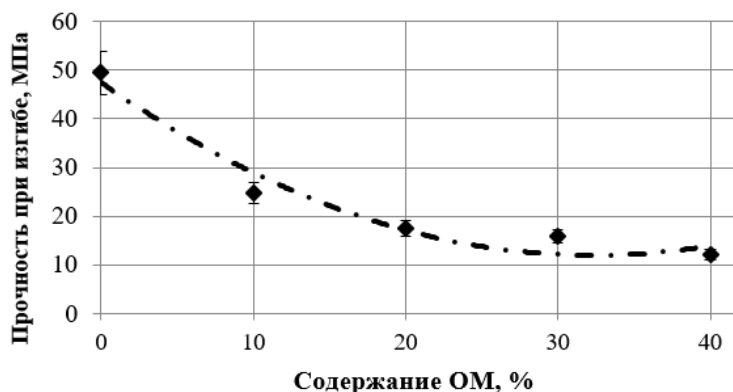


Рис. 3. График зависимости прочности при изгибе наполненных полиуретанов от содержания наполнителя

При увеличении содержания муки шелухи овса марки 250 наблюдается рост показателей водопоглощения после 24 часов (рисунок 4) и 30 суток выдержки. Увеличение показателей водопоглощения объясняется более высокой собственной гидрофильностью частиц наполнителя, а так же снижением однородности материала, связанной введением в состав полиуретана измельченной шелухи овса. Существенный вклад в падение водостойкости материала вносит так же и предполагаемое снижение степени полимеризации полиуретана.

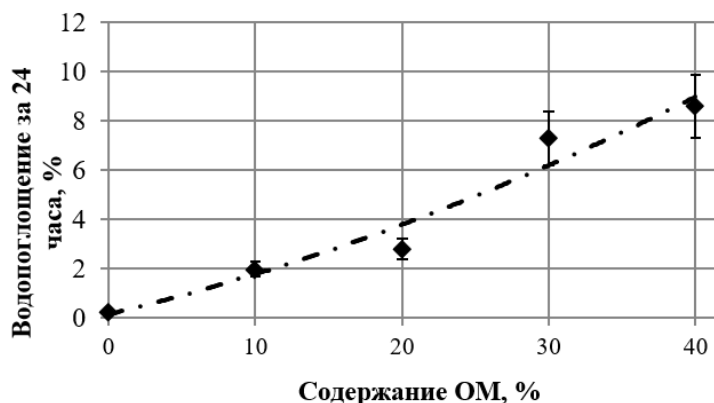


Рис. 4. График зависимости показателя водопоглощения за 24 часа наполненных полиуретанов от содержания наполнителя

По своим эксплуатационным свойствам образцы наполненных измельченной шелухой овса композитов значительно уступают образцам ненаполненного полиуретана. В тоже время их показатели находятся на уровне сопоставимом с показателями древесно-полимерных композитов с термопластичными полимерными матрицами (ДПКт). В таблице 5 представлено сравнение ключевых эксплуатационных свойств композитов на основе литьевого двух компонентного полиуретана Noacast 234 и двух видов наполнителя: древесной муки марки 300 и муки шелухи овса марки 250.

Таблица 5 – Сравнение свойств образцов композитов со степенью наполнения 30 мас. %

Свойство	Наполнитель	
	ОМ-250	ДМ-300
Плотность, кг/м ³	823,0	891,7
Твердость по Бринеллю, МПа	29,5	46,7
Модуль упругости при сжатии, МПа	317,8	561,7
Число упругости, %	42,4	63,5
Пластичность, %	57,6	36,5
Прочность при растяжении, МПа	20,2	31,0
Прочность при изгибе, МПа	15,9	22,7
Ударная вязкость, кДж/м ²	2,0	2,4
Водопоглощение за 24 часа, %	7,3	6,0
Водопоглощение за 30 суток, %	28,3	20,7

По большинству физико-механических свойств композиционные материалы на основе литьевого полиуретана Noacast 234 и муки шелухи овса марки 250 уступают аналогам с древесной мукой, в том числе по показателям твердости по Бринеллю, ударной вязкости и прочности при изгибе.

Заключение

Были проведено исследование физико-механических свойств серии образцов полиуретана Noacast 234, наполненного мукой шелухи овса. В работе показано, что введение в состав двухкомпонентного литьевого полиуретана муки шелухи овса марки 300 негативно сказывается на большинство физико-механических свойств материала.

Так введение наполнителя снижает показатели твердости по Бринеллю, модуля упругости при сжатии, числа упругости, пластичности прочности при растяжении, прочности при изгибе, ударной

вязкости (прочности) и увеличивает показатели водопоглощения за 24 часа и за 30 суток выдержки. В тоже время композиты с полиуретановой матрицей и шелухой овса находятся на сопоставимом уровне с образцами древесно-полимерных композитов с термопластичными полимерными матрицами (ДПКт) и могут являться их прямыми конкурентами. Введение муки шелухи овса в состав полиуретана, способствует снижению стоимости материала, что может являться его дополнительным преимуществом.

Литература

1. Шкуро А.Е. Наполнители аграрного происхождения для древесно-полимерных композитов (обзор)/ А. Е. Шкуро, В. В. Глухих, П. С. Кривоногов, О. В. Стоянов // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т.17 №2. С.160-163.
2. Клёсов, А. А. Древесно-полимерные композиты / А.А. Клёсов. СПб: Научные основы и технологии, 2010. 736 с.
3. Schwarzkopf, M.J. Wood-Plastic Composites-Performance and Environmental Impacts / M.J. Schwarzkopf, M.D. Burnard // Environmental Impacts of Traditional and Innovative Forest-based Bioproducts. – Springer. – 2016. V.2. P. 19-43.
4. Ashori, A. Wood plastic composites as promising green-composites for automotive industries! / A. Ashori // Bioresource Technology. 2008. V.99. P. 4661 -4667.
5. Stael, G.C. Carbon-13 high resolution solid state NMR study of natural fibres obtained from sugar cane without treatment and their composites with EVA/ G.C Stael, J.R.M D'Almeida, S.M.C de Menezes, M.I.B Tavares //J. Polymer Testing. 1998. Vol. 17. N. 3. P. 147-152.
6. Галяветдинов, Н. Р. Биоразлагаемые полимеры как перспективное направление в производстве древесно-наполненных композитов / Н.Р. Галяветдинов // Деревообр. пром-сть. 2015. № 4. С. 49-52.
7. Галяветдинов, Н.Р. Анализ физико-механических свойств композитов на основе полилактида и термомодифицированных древесных волокон / Н.Р. Галяветдинов, Л.В. Ахунова // Деревообр. пром-сть. 2016. № 1. С. 55-59.
8. Галяветдинов, Н.Р. Анализ физико-механических свойств композитов на основе полилактида и термомодифицированных древесных волокон / Н.Р. Галяветдинов // Деревообр. пром-сть. 2016. № 3. С. 31-35.
9. Галяветдинов, Н.Р. Полилактид как перспективный биоразлагаемый полимер для древесно-полимерных композитов / Н.Р. Галяветдинов, Г.Ф. Илалова, А.Р. Мухтарова // Деревообр. пром-сть. 2017. № 3. С. 51-53.
10. Галяветдинов, Н.Р. Исследование физико-механических свойств древесно-наполненных композитов на основе полилактида с целью создания биоразлагаемых упаковок / Н.Р. Галяветдинов, Р.Р. Сафин, Г.А. Талипова, В.И. Петров // Деревообр. пром-сть. 2018. № 4. С. 12-18.
11. Куликов, Д. А. Разработка ресурсосберегающей технологии использования вторичного сырья крупяного производства: дисс ... канд. тех. наук. / Д.А. Куликов // М. 2010. 185 с.
12. Veasarach J. Algal cellulose as a reinforcement in rigid polyurethane foam / Veasarach Jonjaroena, Sarute Ummartyotinb, Supenya Chittapuna // Algal Research. 2020. V.51. P. 1-10.
13. Martins L.S. Influence of the granulometry and fiber content of palm residues on the diesel S-10 oil sorption in polyurethane /palm fiber biocomposites / Larissa S. Martins, Francisco Maciel Monticelli, Daniella R. Mulinari// Results in Materials. 2020. V.8. P. 1-10.
14. Noor Azammi A.M. Physical and damping properties of kenaf fibre filled natural rubber/thermoplastic polyurethane composites/ A.M. Noor Azammi, S.M. Sapuan, Mohamad R. Ishak, Mohamed T.H. Sultan // Defence Technology. 2020. V. 16. P. 29-34.
15. Вадзинский, Р. Статистические вычисления в среде Excel / Р. Вадзинский // СПб. Питер. 2008. 608 с.

© **Чирков Д.Д.** – студент кафедры технологии ЦБП и переработки полимеров, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», (ФГБОУ ВО «УГЛТУ»), e-mail: den.chirkov12@yandex.ru; **Кудрявцев А.Д.** – магистрант кафедры технологии ЦБП и переработки полимеров ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: edge2008@yandex.ru; **Захаров П.С.** – магистрант кафедры технологии ЦБП и переработки полимеров ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: zazaver@mail.ru; **Шкуро А.Е.** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров», ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: zj@weburg.me; **Глухих В.В.** – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии ЦБП и переработки полимеров ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail:

gluhihvv@m.usfeu.ru; **Шишлов О.Ф.** – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии ЦБП и переработки полимеров ФГБОУ ВО «УГЛУТУ», e-mail: o.shishlov@ucpr.ru.

UDC 678

POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS BASED ON POLYURETHANE AND OAT HUSK

D.D. Chirkov, A.D. Kudryavtsev, P.S. Zakharov, A.E. Shkuro, V.V. Glukhikh, O.F. Shishlov

The paper considers the issues of obtaining a composite material based on cast polyurethane and oat husks crushed to the state of flour, as well as determining the indicators of the physical and mechanical properties of the obtained composites and establishing the regularities of the effect of the filler content in the material on its properties. For the obtained samples of filled polyurethanes, the following physical and mechanical properties were determined: density, Brinell hardness, contact modulus of elasticity in compression, plasticity, elasticity number, impact strength, ultimate strength in bending, water absorption in 24 hours, and water absorption in 30 days. Dependences have been established between the content of oat husks in flour samples and their physical and mechanical properties. These dependencies are given as polynomials of the second degree.

Key words: polyurethane, composite, oat husk, physical and mechanical properties

References

1. Shkuro A.E. Agrarian fillers for wood-polymer composites (review) / A. E. Shkuro, V. V. Glukhikh, P. S. Krivonogov, O. V. Stoyanov // Bulletin of Kazan Technological University. 2014. Vol. 17 No. 2. pp.160-163. (InRuss.).
2. Klyosov, A.A. Wood-polymer composites / AA Klyosov. Klyosov. SPb: Scientific bases and technologies, 2010. 736 p. (InRuss.).
3. Schwarzkopf, M.J. Wood-Plastic Composites-Performance and Environmental Impacts / M.J. Schwarzkopf, M.D. Burnard // Environmental Impacts of Traditional and Innovative Forest-based Bioproducts. - Springer. - 2016. V.2. pp.19-43.
4. Ashori, A. Wood plastic composites as promising green-composites for automotive industries! / A. Ashori // Bioresource Technology. 2008. V.99. pp. 4661-4667.
5. Stael, G.C. Carbon-13 high resolution solid state NMR study of natural fibers obtained from sugar cane without treatment and their composites with EVA / G.C Stael, J.R.M D'Almeida, S.M.C de Menezes, M.I.B Tavares // J. Polymer Testing. 1998. Vol.17. No.3. pp.147-152.
6. Galyavetdinov N.R. Biodegradable polymers as a promising direction in the production of wood-filled composites / N.R. Galyavetdinov. Galyavetdinov // Woodworking. prom-st. 2015. No.4. pp.49-52. (InRuss.).
7. Galyavedinov, N.R. Analysis of physical and mechanical properties of composites based on polylactide and thermally modified wood fibers / N.R. Galyavedinov, L.V. Akhunova // Woodworking. prom-st. 2016. No.1. pp.55-59. (InRuss.).
8. Galyavedinov, N.R. Analysis of physical and mechanical properties of composites based on polylactide and thermally modified wood fibers / N.R. Galyavetdinov // Woodworking. prom-st. 2016. No.3. pp.31-35. (InRuss.).
9. Galyavedinov, N.R. Polylactide as a promising biodegradable polymer for wood-polymer composites / N.R. Galyavedinov, G.F. Ilalova, A.R. Mukhtarova // Woodworking. prom -st. 2017. No. 3. pp.51-53. (InRuss.).
10. Galyavetdinov, N.R. Investigation of the physical and mechanical properties of wood-filled composites based on polylactide for the purpose of creating biodegradable packaging / N.R. Galyavedinov, R.R. Safin, G.A. Talipov, V.I. Petrov // Woodworking. prom -st. 2018. No.4. pp.12-18. (InRuss.).
11. Kulikov, DA Development of a resource-saving technology for the use of secondary raw materials of cereal production: diss ... cand. those. sciences. / YES. Kulikov // M. 2010. 185 p. (InRuss.).

12. Veasarach J. Algal cellulose as a reinforcement in rigid polyurethane foam / Veasarach Jonjaroena, Sarute Ummartyotinb, Supenya Chittapuna // *Algal Research*. 2020. V.51. pp.1-10.

13. Martins L.S. Influence of the granulometry and fiber content of palm residues on the diesel S-10 oil sorption in polyurethane / palm fiber biocomposites / Larissa S. Martins, Francisco Maciel Monticelli, Dan-iella R. Mulinari // *Results in Materials*. 2020. V.8. pp.1-10.

14. Noor Azammi A.M. Physical and damping properties of kenaf fiber filled natural rubber / thermoplastic polyurethane composites / A.M. Noor Azammi, S.M. Sapuan, Mohamad R. Ishak, Mohamed T.H. Sultan // *Defense Technology*. 2020. V.16. pp.29-34.

15. Vadzinsky, R. Statistical calculations in the Excel environment / R. Vadzinsky // SPb.: Peter. 2008. 608 p. (In Russ.).

© **Chirkov D.D.** – Student of the department of Pulp and Paper Technologies and Polymer Processing, Ural State Forestry Engineering University (USFU), e-mail: den.chirkov12@yandex.ru.; **Kudryavtsev A.D.** – Student of the department of Pulp and Paper Technologies and Polymer Processing, Ural State Forestry Engineering University (USFU), e-mail: edge2008@yandex.ru.; **Zakharov P.S.** – Student of the department of Pulp and Paper Technologies and Polymer Processing, Ural State Forestry Engineering University (USFU), e-mail: zazaver@mail.ru; **Shkuro A.E.** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Pulp and Paper Technologies and Polymer Processing, USFU, e-mail: zj@weburg.me; **Glukhikh V.V.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of PPI Technology and Polymer Processing USFU, e-mail: gluhihvv@m.usfeu.ru; **Shishlov O.F.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of PPI Technology and Polymer Processing USFU, e-mail: o.shishlov@ucp.ru.

**Авторы, направляющие статьи в журнал «Деревообрабатывающая промышленность»,
должны соблюдать следующие требования**

УДК 721.05 (Шрифт Arial, кегль – 9, выравнивание по левому краю)

**НАЗВАНИЕ СТАТЬИ (НАЗВАНИЕ СТАТЬИ ПРОПИСНЫМИ БУКВАМИ, ШРИФТ
TIMES NEW ROMAN, КЕГЛЬ – 16, ВЫРАВНИВАНИЕ ПО ЛЕВОМУ
КРАЮ ПОЛУЖИРНЫМ ШРИФТОМ)**

И.О. Фамилия авторов (инициалы и фамилия авторов Шрифт Arial, кегль – 9, выравнивание по левому краю полужирным шрифтом. Например, И.И. Иванов)

Аннотация является кратким изложением большей по объему работы. Она отражает научное содержание статьи, содержит сведения о решаемой задаче, методах решения, результатах и выводах. Аннотация не должна содержать рисунки, формулы, литературу и источники финансирования и ссылки на них. Рекомендуемый объем аннотации не менее 1000 букв.

Ключевые слова: не менее 4 слов или словосочетаний, каждое ключевое слово или словосочетание отделяется от другого запятой. (Шрифт Times New Roman, кегль – 9, курсив, выравнивание по ширине, отступ справа и выступ слева – 1 см)

Введение

Текст статьи набирается в текстовом редакторе Microsoft Word. Статьи, представляющие результаты исследований, должны включать разделы: «**Введение**», «**Методы и материалы**», «**Результаты**», «**Заключение**», «**Литература**». Обзорные статьи также должны быть структурированы и состоять из разделов: «**Введение**», «**Обзор исследований в области...**», «**Заключение**», «**Литература**». Макет журнала – однокolumnный, с параметрами страницы: верх -3 см, низ -2,5 см, левое поле – 1,8 см, правое поле – 1,8 см

Десятичные цифры набираются только через запятую, а не через точку (0,25 вместо 0.25). Основной шрифт статьи «Times New Roman», размер шрифта — 11 кегль через 1 интервал, выравнивание по ширине. Абзац — 0,75 см.

Название параграфа

Формулы в статье набираются с использованием математической программы Mathcad или встроенного редактора формул MS Word 2007, курсивом. Использование букв кириллицы в формулах не рекомендуется. Расшифровка обозначений, принятых в формуле, производится в порядке их использования в формуле.

Все формулы желательно пронумеровать, но допустимо нумеровать лишь упоминаемые в тексте. Формулу следует располагать по центру строки, а ее номер по правому краю основного текста и заключать в круглые скобки .

Название параграфа

Рисунки и таблицы необходимо приводить после упоминания их в тексте.

Таблицы нумеруются в порядке упоминания их в тексте, нумерация сквозная (шрифт – Times New Roman, кегль – 11, для объемных – 11 и 12.). Все графы таблицы должны иметь заголовки, сокращение слов в таблицах не допускается (кроме общепринятых). Отсутствие данных обозначается прочерком (–). Названия таблиц размещаются над ними, выравниванием по ширине и выделяются полужирным шрифтом (шрифт названия таблиц – Arial, кегль -8). Подрисовочная надпись выравнивается по ширине текста (шрифт названия таблиц – Arial, кегль -8). Точка в конце подрисовочной надписи не ставится. Цвет рисунков – черно-белый. Рисунки должны быть качественными, **сканированные картинки не принимаются!**

При ссылках на рисунки и таблицы в тексте статьи необходимо указывать аббревиатуру «рис. 1» или «табл. 1».

Заключение

Приводятся выводы по работе, рекомендации по использованию полученных результатов .

Здесь же при необходимости курсивом указывается источник финансирования исследования или благодарности.

Литература

В списке библиографических ссылок приводятся только источники, на которые автор ссылается в тексте. Список литературы составляется в порядке цитирования в работе, все указанные источники нумеруются. Ссылки на цитируемые источники в тексте статьи приводятся в виде цифр, соответствующих номеру работы в списке литературы, заключенных в квадратные скобки. Пример оформления ссылок на цитируемые источники: [1], [1, 2], [1-4]. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Рекомендуется использовать не менее 15 источников.

Ссылку на источник необходимо приводить на том языке, на котором он был опубликован.

Список литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.05-2008.

© **Фамилия И.О. автора** – ученая степень, ученое звание, должность, наименование кафедры, наименование организации, адрес электронной почты (шрифт - Times New Roman, кегль – 10, фамилия и инициалы выделяются полужирным шрифтом)

Данные на английском языке располагаются в конце статьи и следуют в том же порядке и с тем же форматированием, как в варианте на русском языке (УДК, название статьи, инициалы и фамилии авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы и сведения об авторах на английском языке).

