

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ ПРИ ОДНООСНОМ ПРЕССОВАНИИ

М.В. Михеев^{2✉}, А.В. Комина¹, Г.А. Горбачева¹, А.А. Калинина¹,
А.В. Болоцкая², В.Г. Санаев¹, А.М. Столин²

¹ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

²ФГБУН Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения имени А.Г. Мержанова Российской академии наук (ИСМАН), Россия, 142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 8

mmixeev00@mail.ru

Представлены материалы исследования реологических аспектов одноосного прессования измельченной древесины сосны различного фракционного состава. Изучена кинетика деформирования измельченной древесины сосны в режиме постоянной скорости движения плунжера пресса с помощью реологического подхода. Построены реологические кривые напряжение — деформация для различных фракций ($d < 1$ мм; $1 < d < 2$; $2 < d < 3$; $d > 5$). Получены компрессионные кривые зависимости плотности прессовок от давления. Показано, что фракции размером частиц менее 1 мм обладают наилучшими параметрами прессуемости и достигают более высокой плотности при меньших значениях давления ($\rho_{\text{заг}} = 1,03$ г/см³ при $P = 180$ МПа). Другие изученные фракции имели приблизительно одинаковую прессуемость и плотность $\rho_{\text{заг}}$ в диапазоне 0,85...0,90 г/см³ при $P = 140...160$ МПа. Дальнейшее увеличение давления прессования не приводило к увеличению плотности из-за упругого расширения после снятия нагрузки. Предложены установка и способ оценки прочности прессовок при свободном падении. Определена наибольшая прочность прессовок при падении фракции размером более 5 мм. Полученные результаты можно применять для оптимизации процесса прессования измельченной древесины и разработки более эффективных методов использования древесных ресурсов.

Ключевые слова: реология, прессование, измельченная древесина сосны, отходы лесозаготовительного и деревообрабатывающего производств

Ссылка для цитирования: Михеев М.В., Комина А.В., Горбачева Г.А., Калинина А.А., Болоцкая А.В., Санаев В.Г., Столин А.М. Исследование реологического поведения измельченной древесины сосны при одноосном прессовании // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 2. С. 116–126.
DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-116-126

Обеспечение комплексного использования лесного сырья, включая низкокачественную древесину, относится к основным направлениям развития лесной промышленности и отражено в Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года [1]. Переориентация отрасли с экспорта необработанных лесоматериалов на производство продукции с высокой добавленной стоимостью предполагает совершенствование имеющихся и разработку новых технологий переработки добываемой древесины [2–11].

В подавляющем большинстве случаев ветви и верхушки деревьев остаются на месте вырубки, что приводит к потере сырья, которое могло бы быть использовано в деревоперерабатывающей промышленности. Такая практика приводит к загрязнению лесных экосистем и увеличению риска возникновения пожаров в теплый сезон года [12, 13]. На предприятиях, специализирующихся на производстве пилопродукции, такие отходы про-

изводства, как опилки, щепа, стружка, обалол не применяются в должной мере [14–16]. При этом они являются ценным сырьем, которое можно использовать для производства новых материалов и в других целях [17–23].

При распиловке бревен и производстве пиломатериалов образуются отходы различных размеров и форм. Основной составляющей этих отходов является измельченная древесина, поскольку размер частиц, конфигурация и способ производства могут изменяться [24]. Древесные отходы, включая отсев и мелкую фракцию щепы, направляются на утилизацию, используемую для производства пара и энергии, либо складываются в кучи и вывозятся на свалку. Доля отсева щепы может составлять до 8 % общего объема измельчаемой древесины.

Одним из подходов решения проблемы использования неликвидной измельченной древесины является ее переработка и последующее использование в лесопромышленном производстве и бытовом применении. Примером реализации данного подхода

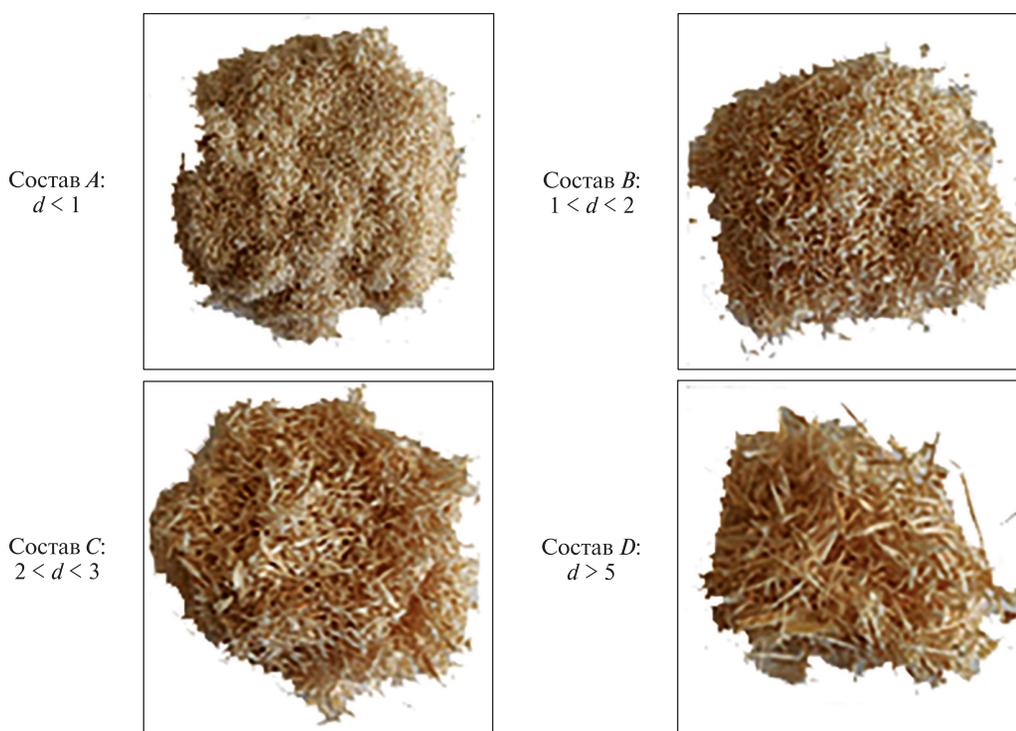


Рис. 1. Исследуемые фракционные составы измельченной древесины сосны, d — размер частиц, мм
Fig. 1. Investigated fractional compositions of disintegrated pine wood, d — particle size, mm

является измельчение неликвидной древесины с дальнейшим прессованием в виде топливных брикетов [25–29]. Для развития теории компактирования важно учитывать зависимость деформационных свойств конгломерата от его плотности. Иными словами, для эффективного использования отходов лесопромышленного производства важно исследовать реологическое поведение измельченной древесины при переработке сырья.

Изучение реологического поведения измельченной древесины является важным аспектом при рассмотрении технологии ее переработки и использования [30–33]. Реология относится к изучению текучих свойств материалов при воздействии на них механических сил и деформаций. Измельченная древесина представляет собой композитный материал, состоящий из различных частиц разных размеров и форм. Реологические свойства определяются взаимодействием между частицами, их концентрацией и структурой. Важными параметрами, характеризующими реологическое поведение измельченной древесины, являются прессуемость, вязкость, пластичность, упругость и течение материала при различных условиях.

Изучение реологии измельченной древесины при одноосном прессовании перспективно как в фундаментальном аспекте исследования сыпучих материалов, так и в прикладном значении, например для технологии производства брикетов [34–37] или строительных материалов.

При этом процессе материал подвергается давлению в одном направлении, что приводит к его компактированию и формированию заготовок определенной формы и размера [38, 39]. Реологические характеристики материала влияют на его способность поддаваться прессованию, формированию и прочности полученных брикетов.

Более глубокое изучение реологии измельченной древесины позволяет оптимизировать параметры процесса прессования, выбрать оптимальные условия и технологии переработки отходов лесозаготовки. Такие исследования способствуют повышению эффективности использования неликвидной древесины и снижению негативного влияния на окружающую среду.

Цель работы

Цель работы — изучить реологическое поведение измельченной древесины при одноосном прессовании, определить оптимальные параметры прессования, а также изучить влияние фракционного состава на прессуемость и прочность полученных заготовок.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования была выбрана измельченная из отходов лесозаготовительного производства древесина сосны, четырех фракционных составов ($d < 1$ мм; $1 < d < 2$; $2 < d < 3$; $d > 5$) камерной сушки (рис. 1).

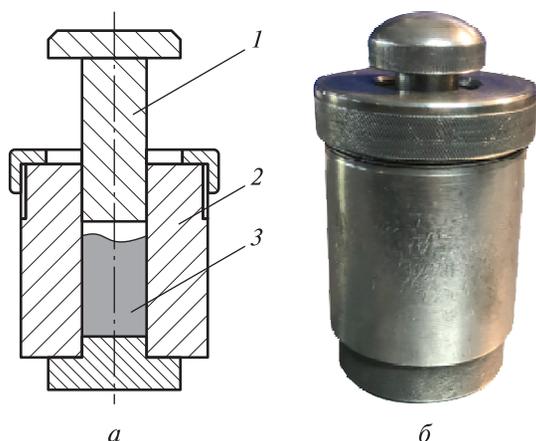


Рис. 2. Схема (а) и внешний вид (б) металлической пресс-формы: 1 — шток; 2 — пресс-форма; 3 — засыпка исследуемого состава

Fig. 2. Scheme (a) and appearance (b) of the metal mould: 1 — stem; 2 — mould; 3 — backfill of the investigated composition

Перед операцией взвешивания измельченную древесину поочередно засыпали в металлическую пресс-форму (рис. 2) до краев, после чего высыпали и взвешивали на электронных весах CAS MWP-300, с точностью измерения до 0,1 %. Диаметр рабочего объема пресс-формы составлял 25 мм.

Расчет насыпной плотности выполнен по формуле

$$\rho_{\text{нас}} = \frac{m}{Sh}, \quad (1)$$

где m — масса насыпки, г;

S — площадь сечения загрузочной камеры, см²;

$h_{\text{нас}}$ — высота насыпного слоя, см.

$$\rho_{\text{п}} = \frac{m_{\text{п}}}{\pi r^2 h_{\text{п}}}, \quad (2)$$

где $m_{\text{п}}$ — масса прессовки;

r^2 — радиус прессовки, см;

$h_{\text{п}}$ — высота прессовки, см.

Относительная плотность прессовки определялась по формуле

$$\rho_{\text{отн}} = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{д.в}}}, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{д.в}}$ — плотность древесинного вещества, равная 1,53 г/см³.

Деформирование исследуемых составов проведено на универсальной испытательной машине «INSTRON 3369» в режиме постоянной скорости 5 мм/с. Обеспечиваемая точность измерения составляла 1 %. Весь экспериментальный ряд выполнен в комнатных условиях. Подготовленная металлическая пресс-форма (см. рис. 2) с исследуемым составом была установлена под плунжер испытательной машины. На плунжер подана нагрузка, под действием которой шток де-

формировал объем засыпки, при этом происходило уплотнение смеси до максимальной нагрузки, по достижении которой нагрузку снимали, а прессовку извлекали. Используя программное обеспечение испытательной машины «INSTRON 3369», были построены реологические кривые зависимости между напряжениями и деформациями (характерный вид кривой представлен на рис. 3), по которым можно судить о реологических свойствах исследуемого состава и оптимальных условиях прессуемости.

Определение зависимости плотности заготовок от давления прессования было проведено на универсальной машине сжатия. Диапазон прикладываемого давления изменяли от 20 до 200 МПа с шагом 20 МПа. Пресс-форма со смесью была установлена под плунжер машины сжатия, к которому прикладывали постоянное давление. После уплотнения и пребывания прессовки под постоянным давлением в течение 30 с прессовку извлекали, затем измеряли ее массу и высоту, рассчитывали плотность при каждом приложенном давлении.

Влияние фракционного состава измельченной древесины сосны на прочность прессовок, полученных без использования пластификаторов, изучали с помощью разработанной установки (рис. 4).

В качестве критерия прочности применяли сопротивление разрушению при свободном падении с высоты 2 м. Для этого на платформу установили прессовку, затем выдергивали веревкой стопорный стержень, удерживающий платформу и образец под действием силы тяжести, падал на стальную плиту, всегда в одно и то же место. Эксперименты проводились с образцами, полученными при низких значениях давления прессования — от 20 до 60 МПа, поскольку более спрессованные образцы менее подвержены разрушению в данных условиях. После каждого падения фиксировалось изменение массы прессовки, критическим показателем служила потеря массы прессовки более чем на 20 %.

Результаты и обсуждение

Нами установлены зависимости приложенного давления и плотности прессовок. На этом основании выполнена оценка уплотняемости сыпучих материалов, которая позволяет, в дальнейшем, выбрать необходимое давление, обеспечивающее заданное значение плотности (рис. 5).

Первая стадия на реологической кривой характеризуется линейным ростом напряжений при увеличении деформации. Деформирование объема материала идет в результате перемещения частиц одной относительно другой, т. е. происходит заполнение пустот.

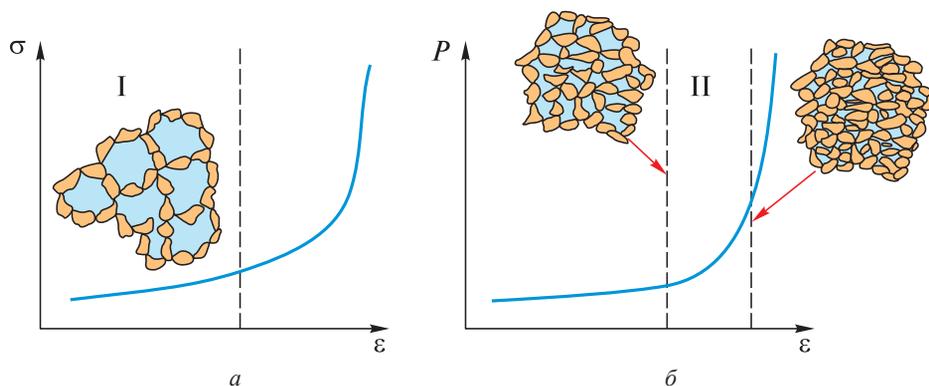


Рис. 3. Характерный вид реологической кривой давление — деформация: *a* — первая стадия (I) — слабый линейный рост напряжения при увеличении деформации; *б* — вторая стадия (II) — интенсивный нелинейный рост напряжений при незначительном увеличении деформации

Fig. 3. Characteristic view of pressure-strain rheological curve: *a* — first stage (I) — weak linear stress growth with strain increase; *б* — second stage (II) — intensive non-linear stress growth with insignificant strain increase

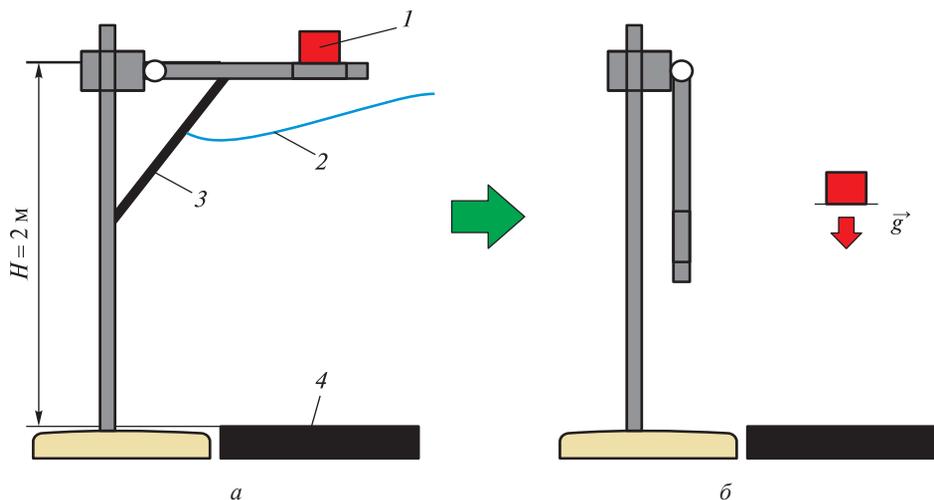


Рис. 4. Схема установки свободного падения: *a* — установка в сборе: *1* — образец; *2* — веревка; *3* — стопорный стержень; *4* — стальная плита; *б* — проведение эксперимента

Fig. 4. Scheme of the free fall installation: *a* — complete installation: *1* — specimen; *2* — rope; *3* — locking rod; *4* — steel plate; *б* — carrying out the experiment

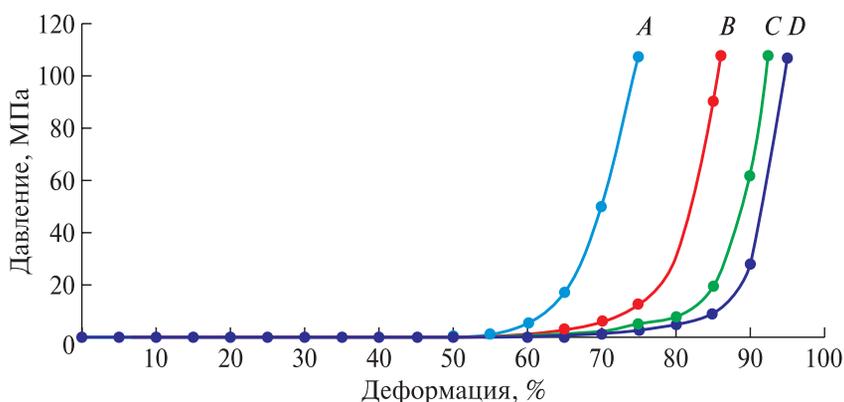


Рис. 5. Реологические кривые для различного фракционного состава измельченной древесины сосны: *A* — $d < 1$; *B* — $1 < d < 2$; *C* — $2 < d < 3$; *D* — $d > 5$

Fig. 5. Rheological curves for different fractional composition of disintegrated pine wood: *A* — $d < 1$; *B* — $1 < d < 2$; *C* — $2 < d < 3$; *D* — $d > 5$

Исходные параметры насыпки (сосна) и полученные значения плотности прессовки
Initial bulk parameters (pine) and obtained values of press density

Состав	Масса, г	Высота, см	Высота прессовки, мм	Плотность насыпки $\rho_{нас}$, г/см ³	Плотность прессовки $\rho_{пресс}$, г/см ³	Относительная плотность $\rho_{отн}$
$d < 1$ мм	3,122	4,9	0,6	0,131	1,060	0,693
$1 < d < 2$ мм	3,195	5,3	0,7	0,123	0,930	0,608
$2 < d < 3$ мм	3,382	5,7	0,8	0,121	0,862	0,563
$d > 5$ мм	3,358	6,7	0,8	0,103	0,855	0,559

Вторая стадия на реологической кривой соответствует очень крутому нелинейному подъему напряжения при незначительном увеличении деформации. На этой стадии перемещение частиц происходит вследствие аккомодации (приспособления) их между собой и частично благодаря деформации объема частиц. Данная стадия требует больших усилий для дальнейшего деформирования материала. Именно она представляет наибольший технологический интерес, поскольку на этой стадии в материале накапливается определенная пластическая деформация, обеспечивающая прочность.

Для третьей стадии при значительном росте давления прессования деформация практически не увеличивается, так как плотность прессовки равна или приблизительно равна плотности компакта (плотности древесинного вещества) (таблица).

Для более подробного рассмотрения процесса прессования на второй стадии реологической кривой были построены зависимости плотности прессовки от давления (компрессионные кривые), иными словами, для интервала давления от 20 МПа до 200 МПа были получены значения плотности прессовок. При достижении предельной плотности (высота прессовки не уменьшается, деформация не происходит) переходили на следующий состав. В результате экспериментов получали компрессионные кривые — графики зависимости плотности прессовки от прикладываемого давления (рис. 6).

Установлено, что наилучшими показателями прессуемости (максимальная плотность $\rho_{зар} = 1,03$ г/см³ при $P = 180$ МПа) обладает фракция $d < 1$ мм. Другие изучаемые фракционные составы $1 < d < 2$ мм; $2 < d < 3$ мм; $d > 5$ мм обладают приблизительно одинаковыми показателями прессуемости ($\rho_{зар} = 0,90$ г/см³ при $P = 160$ МПа; $\rho_{зар} = 0,88$ г/см³ при $P = 140$ МПа; $\rho_{зар} = 0,85$ г/см³ при $P = 140$ МПа соответственно). Связано это с тем, что более мелкие частицы имеют большую поверхность контакта между собой, что способствует лучшей сцепке и формированию более плотной структуры прессовки. В результате, при одном и том же давлении прессования, фракция

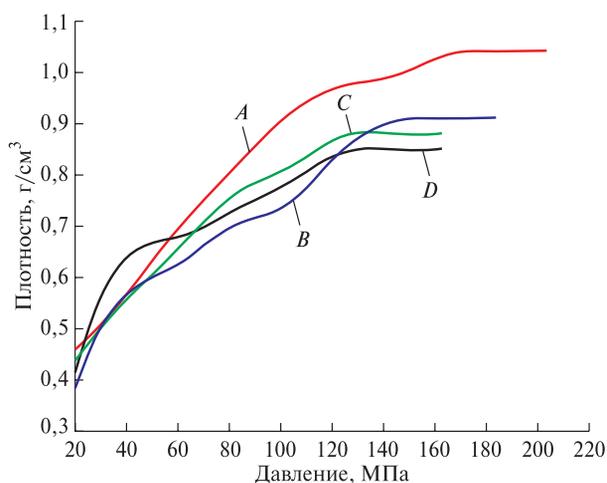


Рис. 6. Компрессионные кривые плотность — давление для различного фракционного состава измельченной древесины сосны: А — $d < 1$; В — $1 < d < 2$; С — $2 < d < 3$; D — $d > 5$

Fig. 6. Compression density-pressure curves for different fractional composition of disintegrated pine wood: А — $d < 1$; В — $1 < d < 2$; С — $2 < d < 3$; D — $d > 5$

с размером частиц менее 1 мм достигает более высокой плотности.

Дальнейшее увеличение давления прессования свыше определенного уровня не приводит к увеличению плотности прессовки. Это может быть связано с явлением упругого расширения после снятия нагрузки. Когда давление снимается, прессовка может немного восстанавливать свою первоначальную форму и увеличивает объем, что ограничивает возможность повышения плотности.

Изучение влияния фракционного состава измельченной древесины сосны на прочность проводилось на заготовках, спрессованных в низком диапазоне давления прессования (20, 40, 60 МПа). Использование прессовок, полученных при больших давлениях, не позволило отследить влияние именно фракционного состава при данном методе испытаний ввиду их высокой прочности. Результаты испытаний представлены на рис. 7.

При свободном падении с высоты 2 м все заготовки, спрессованные под давлением 20 МПа (см. рис. 7, а) из фракций $d < 1$, $1 < d < 2$ и $2 < d < 3$ мм потеряли более 20 % своей массы уже после

первого падения. Прессовка из самой крупной фракции $d > 5$ мм разрушилась после четырех падений.

Результаты испытаний прессовок, полученных под давлением 40 МПа (см. рис. 7, б), коррелируют с прошлыми показателями. Наибольшей сопротивляемостью разрушению при свободном падении обладали прессовки из крупной фракции $d > 5$ мм, критическая потеря массы произошла после 14 падений. Другие прессовки из фракций $d < 1$, $1 < d < 2$ и $2 < d < 3$ мм разрушились после 4, 3 и 5 падений соответственно.

При испытаниях прессовок, полученных под давлением 60 МПа (см. рис. 7, в), такую же стойкость к разрушению при свободном падении показали прессовки из фракции $d > 5$ мм, критическое разрушение которых наступило после 20-го падения. Другие прессовки из фракций $d < 1$, $1 < d < 2$ и $2 < d < 3$ мм разрушились после 14, 12 и 7 падений соответственно.

Повышенная прочность фракции измельченной древесины с размером частиц более 5 мм может быть связана с несколькими факторами. Во-первых, крупные частицы обладают более высокой начальной плотностью по сравнению с мелкими частицами, что может способствовать усилению внутренних связей и структуры прессовки. Более высокая плотность может привести к увеличению сопротивления при воздействии механических сил, что способствует повышению прочности. Во-вторых, фракция с более крупными частицами может обеспечить большую поверхность контакта между частицами при формировании прессовки. Это может способствовать лучшей сцепке между частицами и повышению механической прочности прессовки. Совокупность данных факторов приводит к тому, что фракция с более крупными частицами может образовать более прочную и устойчивую структуру внутри прессовки. Это способствует лучшему распределению напряжений и уменьшению вероятности разрушения при воздействии внешних сил.

Выводы

Полученные результаты подчеркивают значимость фракционного состава, давления прессования и прочности прессовок при оптимизации процесса переработки древесного материала.

Наилучшие результаты прессуемости (максимальная плотность $\rho_{\text{заг}} = 1,03$ г/см³ при $P = 180$ МПа) были достигнуты при использовании фракции с размером частиц $d < 1$ мм. Остальные исследуемые фракции с размерами частиц от 1 до 5 мм демонстрируют примерно одинаковую прессуемость ($\rho_{\text{заг}} = 0,90$ г/см³ при $P = 160$ МПа; $\rho_{\text{заг}} = 0,88$ г/см³ при $P = 140$ МПа; $\rho_{\text{заг}} = 0,85$ г/см³ при $P = 140$ МПа соответственно).

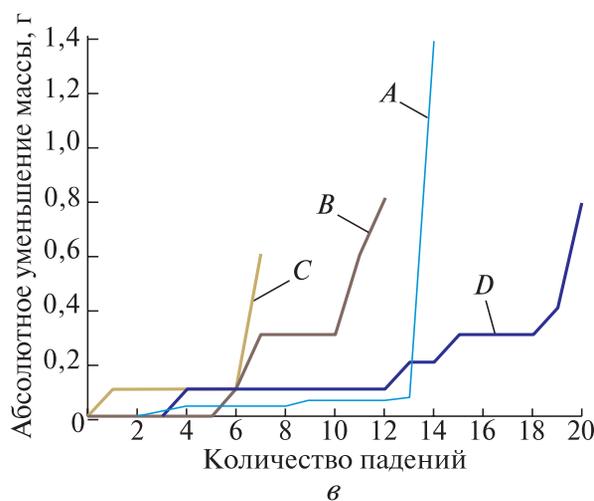
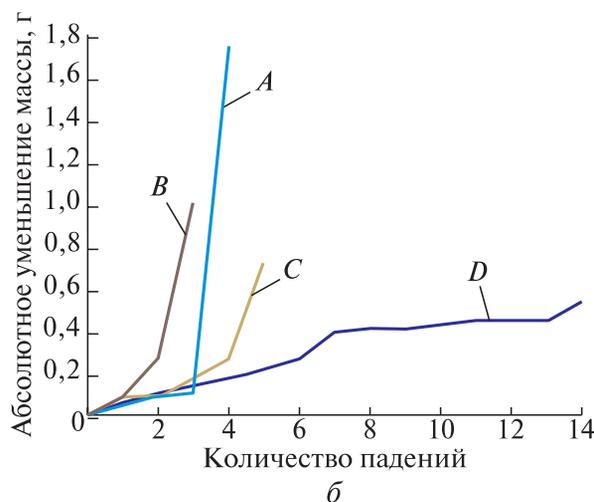
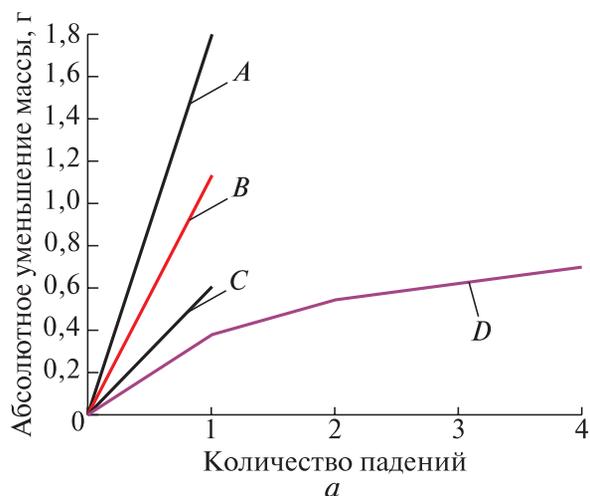


Рис. 7. Абсолютное уменьшение массы при свободном падении образцов исследуемых фракционных составов измельченной древесины сосны (A — $d < 1$; B — $1 < d < 2$; C — $2 < d < 3$; D — $d > 5$), спрессованных под давлением: а — 20 МПа; б — 40 МПа; в — 60 МПа

Fig. 7. Absolute mass reduction at free settling of investigated fractional compositions samples of disintegrated pine wood (A — $d < 1$; B — $1 < d < 2$; C — $2 < d < 3$; D — $d > 5$) compressed under pressure: а — 20 МПа; б — 40 МПа; в — 60 МПа

Дальнейшее повышение давления не приводит к увеличению плотности прессовок.

Разработанная и примененная методика оценки прочности прессовок путем измерения абсолютной потери массы при их свободном падении с высоты 2 м показала, что прессовки с фракцией размером частиц $d > 5$ мм обладают наибольшей прочностью при падении, что позволяет получить фундаментальное представление о влиянии размера частиц измельченной древесины на прочностные характеристики заготовок.

Для дальнейшего развития этого исследования возможны несколько перспективных направлений: 1) углубленный анализ механизмов деформации и дробления измельченной древесины при прессовании для лучшего понимания внутренних процессов и оптимизации структуры получаемых материалов; 2) изучение влияния различных параметров процесса — температуры, влажности, скорости прессования и формы плунжера, на реологические свойства и качество конечной продукции, в целях оптимизации условий прессования для достижения наилучших результатов; 3) сравнительный анализ реологического поведения измельченной древесины различных древесных пород, для дальнейшего выявления особенностей их поведения и определения наиболее подходящих видов для конкретного применения; 4) исследование перспективности использования древесины в производстве композитных материалов или топливных брикетов для развития устойчивых и экологически эффективных методов переработки древесных ресурсов.

Работа выполнена по госзаданию в рамках договора о сотрудничестве между ФГБУН «Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения имени А.Г. Мерджанова Российской академии наук» (ИСМАН) и ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал). Для работы были использованы оборудование и методики лаборатории № 7 «Пластического деформирования материалов» (ИСМАН) и Центра коллективного пользования научным оборудованием «Центр физико-механических испытаний древесины» (ЦКП ЦФМИД) МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал).

Список литературы

[1] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 11 февраля 2021 г. № 312-р (об утверждении Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года). URL: <http://static.government.ru/media/files/pFdqtWFH8y9SsfQjDE0Xnwd8eXWoJMYB.pdf> (дата обращения 20.10.2023).

- [2] Власов Ю.Н. Научные основы совершенствования технологии брикетирования отходов лесопереработки: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Архангельск, 2021. 261 с.
- [3] Трофимова Н.В., Сазыкина М.Ю., Мамлеева Э.Р. Особенности развития лесопромышленного комплекса в регионах Российской Федерации // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 6. С. 118–126. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-6-118-126
- [4] Sun X., He M., Li Z. Novel engineered wood and bamboo composites for structural applications: State-of-art of manufacturing technology and mechanical performance evaluation // Construction and Building Materials, 2020, no. 249, p. 118751. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118751
- [5] Grigorev I., Shadrin A., Katkov S., Borisov V., Druzyanova V., Gnatovskaya I., Diev R., Kaznacheeva N., Levushkin D., Akinin D. Russian sawmill modernization (a case study). Part 2: improving the efficiency of wood chipping operations // International Wood Products J., 2021, v. 12, no. 2, pp. 128–134. DOI: 10.1080/20426445.2020.1871276
- [6] Hosseini S.M., Peer A. Wood products manufacturing optimization: A survey // IEEE Access, 2022, v. 10, pp. 121653–121683. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3223053
- [7] Пастори З., Горбачева Г.А., Санаев В.Г., Мохачине И.Р., Борчок З. Состояние и перспективы использования древесной коры // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 5. С. 74–88. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-5-74-88
- [8] Кулагин Е.П. Технологии использования отходов и малоценных продуктов химической переработки древесины: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.03. Нижний Новгород, 2001. 361 с.
- [9] Sandberg D., Haller P., Navi P. Thermo-hydro and thermo-hydro-mechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products // Wood Material Science & Engineering, 2013, no. 8(1), pp. 64–88. DOI: 10.1080/17480272.2012.751935
- [10] Казымов Д.С., Махотина Л.Г., Никандров А.Б., Кузнецов А.Г., Аким Э.Л. Особенности переработки древесины *Larix sibirica* Ledeb (Pinaceae) в волокнистые полуфабрикаты высокого выхода // Химия растительного сырья, 2021. № 1. С. 317–325. DOI: 10.14258/JCPRM.2021018472
- [11] Singh J., Ordoñez I. Resource recovery from post-consumer waste: important lessons for the upcoming circular economy // J. of Cleaner Production, 2016, no. 134, pp. 342–353. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.12.020
- [12] Faremi O.E., Sogbanmu T.O., Adeyemo O.K. How sawmill wastes impact surface water, sediment, macrobenthic invertebrates, and fish: a case study of the Lagos lagoon, Okobaba Area, South-western Nigeria // Environmental Monitoring and Assessment, 2021, no. 193, pp. 1–13. DOI: 10.1007/s10661-021-09006-0
- [13] Жарская Я.П., Федосенко И.Г. Получение топливных гранул с высокими качественными характеристиками из щепы низкого качества // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов, 2023. № 2 (270). С. 210–216. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-24
- [14] Dudzicz P., Stachowicz P., Stolarski M. J. Diversity of properties of sawmill residues used as feedstock for energy generation // Renewable Energy, 2023, no. 202, pp. 822–833. DOI: 10.1016/j.renene.2022.12.002
- [15] Sandberg D., Gorbacheva G., Lichtenegger H., Niemz P., Teischinger A. Advanced Engineered Wood-Material Concepts. In: Niemz, P., Teischinger, A., Sandberg, D. (eds) Springer Handbook of Wood Science and Technology // Springer Handbooks. Springer, Cham, 2023, pp. 1835–1888. DOI: 10.1007/978-3-030-81315-4_35

- [16] Сафин Р.Г., Зиятдинов Р.Р., Сотников В.Г., Рябушкин Д.Г., Ахметова Д.А. Моделирование процесса сушки древесных отходов в установке производства активированного угля // Системы. Методы. Технологии, 2021. № 4. С. 79–86. DOI: 10.18324/2077-5415-2021-4-79-86
- [17] Валеев И.А. Термическая переработка отходов деревообрабатывающих предприятий: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08. Казань, 2006. 153 с.
- [18] Булатов А.Ф. Обоснование процесса заготовки и переработки биомассы дерева на технологическую щепу с целью ресурсосбережения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Санкт-Петербург, 2001. 19 с.
- [19] Rejda M., Czardybon A., Ignasiak K., Robak J. Utilization of waste forest biomass: Pelletization studies of torrefied sawmill wood chips // Proc. of the 11th Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering EKO-DOK 2019, Polanica-Zdrój, Poland, April 8–10, 2019. E3S Web of Conferences, 2019, v. 100, p. 00068. DOI: 10.1051/e3sconf/201910000068
- [20] Amiandamhen S.O., Adamopoulos S., Adl-Zarrabi B., Yin H., Norén J. Recycling sawmilling wood chips, biomass combustion residues, and tyre fibres into cement-bonded composites: Properties of composites and life cycle analysis // Construction and Building Materials, 2021, no. 297, p. 123781. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123781
- [21] Kowaluk G., Wronka A. Bonding of sawmill birch wood with selected biopolymer-based glues. Annals of Warsaw University of Life Sciences SGGW Forestry and Wood Technology, 2020, no. 109, pp. 32–36. DOI: 10.5604/01.3001.0014.3092
- [22] Mirski R., Dukarska D., Derkowski A., Czarnecki R., Dziurka D. By-products of sawmill industry as raw materials for manufacture of chip-sawdust boards // J. of Building Engineering, 2020, no. 32, p. 101460. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101460
- [23] Тулузаков Д.В., Спиринов Б.Л. Модель формирования насыпной структуры пакета композиционного материала из измельченных древесных частиц // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2018. Т. 22. № 2. С. 95–103. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-2-95-103
- [24] Степанов В.И., Мезина Н.А. Отходы лесной промышленности и их использование в национальном хозяйстве // Вестник Российского экономического университета им. Г. В. Плеханова, 2012. № 3. С. 83–88.
- [25] Морозов Д.К., Морозова И.В., Васильев С.Б. Использование мягких отходов лесопиления с целью производства топливных брикетов // Resources and Technology, 2018. Т. 15. № 3. С. 1–28. DOI: 10.15393/j2.art.2018.4181
- [26] Parajuli R. Wood pellets versus pulp and paper: Quantifying the impacts of wood pellets on the pulpwood markets in the southeastern United States. Journal of Cleaner Production, 2021, no. 317, p. 128384. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128384
- [27] Civitarese V., Acampora A., Sperandio G., Assirelli A., Picchio R. Production of wood pellets from poplar trees managed as coppices with different harvesting cycles // Energies, 2019, v. 12, no. 15, p. 2973. DOI: 10.3390/en12152973
- [28] Thiffault E., Barrette J., Blanchet P., Nguyen Q.N., Adjalle K. Optimizing quality of wood pellets made of hardwood processing residues // Forests, 2019, v. 10, no. 7, p. 607. DOI: 10.3390/f10070607
- [29] Quinteiro P., Tarelho L., Marques P., Martín-Gamboa M., Freire F., Arroja L., Dias A.C. Life cycle assessment of wood pellets and wood split logs for residential heating. Science of the Total Environment, 2019, v. 689, pp. 580–589. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.420
- [30] Свиридов Л.Т., Дорняк О.Р. Реология древесины в процессах ее модифицирования // Записки Горного института, 2005. Т. 166. С. 239–241.
- [31] Михеев М.В. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез материалов на основе дисилицида молибдена в условиях давления со сдвигом: дис. ... канд. техн. наук: 17.10.18. Черноголовка, 2018. 141 с.
- [32] Kamperidou V. Quality Analysis of Commercially Available Wood Pellets and Correlations between Pellets Characteristics // Energies, 2022, v. 15, no. 8, p. 2865. DOI: 10.3390/en15082865
- [33] Lehmann B., Schröder H.W., Wollenberg R., Repkeet J.U. Effect of miscanthus addition and different grinding processes on the quality of wood pellets // Biomass and bioenergy, 2012, no. 44, pp. 150–159. DOI: 10.1016/j.biombioe.2012.05.009
- [34] Анциферов В.Н., Перельман В.Е. Механика процессов прессования порошковых и композиционных материалов. М.: Грааль, 2001. 628 с.
- [35] Бучацкий Л.М., Столин А.М. Высокотемпературная реология СВС-материалов // Инженерно-физический журнал, 1992. Т. 63. № 5. С. 593–604.
- [36] Петросян Г.Л. Пластическое деформирование порошковых материалов. М.: Металлургия, 1988. 152 с.
- [37] Nielsen S.K., Rezaei H., Mandø M., Sokhansanj S. Constitutive modelling of compression and stress relaxation in pine pellets // Biomass and Bioenergy, 2019, no. 130, p. 105370. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.105370
- [38] Pietsch W.B. Agglomeration processes: phenomena, technologies, equipment. Weinheim: John Wiley & Sons, 2008. DOI: 10.1002/9783527619801
- [39] Чибирев О.В., Куницкая О.А., Давтян А.Б. Анализ исследований процесса брикетирования отходов лесопереработки на гидравлическом прессовом оборудовании // Resources and Technology, 2019. Т. 16. № 2. С. 97–118. DOI: 10.15393/j2.art.2019.4522

Сведения об авторах

Михеев Максим Валерьевич  — канд. техн. наук, науч. сотр. лаборатории № 7 «Пластического деформирования материалов» ФГБУН «Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения имени А.Г. Мержанова Российской академии наук» (ИСМАН), mmixeev00@mail.ru

Комина Алиса Вадимовна — магистрант ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), kominaalisa005@gmail.com

Горбачева Галина Александровна — канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), gorbacheva@bmstu.ru

Калинина Алена Анатольевна — ст. преп. ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), kalinina@mgul.ac.ru

Болоцкая Анастасия Вадимовна — канд. техн. наук, научный сотрудник лаборатории № 7 «Пластического деформирования материалов» ФГБУН «Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения имени А.Г. Мержанова Российской академии наук» (ИСМАН), moon@ism.ac.ru

Санаев Виктор Георгиевич — д-р техн. наук, профессор, директор Мытищинского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», vgsanaev@bmstu.ru

Столин Александр Моисеевич — д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. лабораторией №7 «Пластического деформирования материалов» ФГБУН «Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения имени А.Г. Мержанова Российской академии наук» (ИСМАН), amstolin@ism.ac.ru

Поступила в редакцию 22.10.2023.

Одобрено после рецензирования 20.12.2023.

Принята к публикации 06.02.2024.

STUDY OF DISINTEGRATED PINE WOOD RHEOLOGICAL BEHAVIOR UNDER UNI-AXIAL COMPRESSING

M.V. Mikheev², A.V. Komina¹, G.A. Gorbacheva¹, A.A. Kalinina¹,
A.V. Bolotskaya², V.G. Sanaev¹, A.M. Stolin²

¹BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

²Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of Sciences (ISMAN), 8, Academician Osipyan st., 142432, Chernogolovka, Moscow reg., Russia

mmixeev00@mail.ru

Materials for studying the rheological behavior of disintegrated pine wood under uniaxial compressing are presented. The kinetics of disintegrated pine wood deformation was studied in the mode of constant speed movement of the press plunger using a rheological approach. Rheological stress-strain curves were constructed for various fractions ($d < 1$ mm; $1 < d < 2$; $2 < d < 3$; $d > 5$). Compression curves of compact density versus pressure were obtained. It has been shown that fractions with particle sizes less than 1 mm have the best compressibility parameters and achieve higher densities at lower pressures ($\rho_{\text{zar}} = 1,03$ g/cm³ at $P = 180$ MPa). Other studied fractions had approximately the same compressibility and density ρ_{zar} in the range of 0,85...0,90 g/cm³ at $P = 140...160$ MPa. A further increase in pressure level did not lead to an increase in density due to elastic expansion after removal of the load. The greatest strength of pressings was determined when a fraction of more than 5 mm in size. An installation and a method for assessing the strength of pressings in free settling are proposed. The results obtained can be used to optimize the process of pressing disintegrated wood and develop more efficient methods for using wood resources.

Keywords: rheology, pressing, disintegrated pine wood, waste from logging and wood processing industries

Suggested citation: Mikheev M.V., Komina A.V., Gorbacheva G.A., Kalinina A.A., Bolotskaya A.V., Sanaev V.G., Stolin A.M. *Issledovanie reologicheskogo povedeniya izmel'chenoy drevesiny sosny pri odnoosnom pressovanii* [Study of disintegrated pine wood rheological behavior under uni-axial compressing]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 116–126. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-116-126

References

- [1] *Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 11 fevralya 2021 g. № 312-r Strategiya razvitiya lesnogo kompleksa Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda* [Order of the Government of the Russian Federation of February 11, 2021, no. 312-r Strategy for the development of the forestry complex of the Russian Federation until 2030]. Available at: <http://static.government.ru/media/files/pFdqtWFH8y9SfQjDE0Xnwd8eXWoJJMYB.pdf> (accessed 20.10.2023).

- [2] Vlasov Yu.N. *Nauchnye osnovy sovershenstvovaniya tekhnologii briketirovaniya otkhodov lesopererabotki* [Scientific basis for improving the technology of briquetting wood waste]. Diss. Dr. Sci. (Tech.). Arkhangel'sk, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 2021, 261 p.
- [3] Trofimova N.V., Sazykina M.Yu., Mamleeva E.R. *Osobennosti razvitiya lesopromyshlennogo kompleksa v regionah Rossiyskoy Federacii* [Features of the development of the timber industry complex in the regions of the Russian Federation]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, v. 25, no. 6, pp. 118–126. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-6-118-126
- [4] Sun X., He M., Li Z. Novel engineered wood and bamboo composites for structural applications: State-of-art of manufacturing technology and mechanical performance evaluation. *Construction and Building Materials*, 2020, no. 249, p. 118751. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118751
- [5] Grigorev I., Shadrin A., Katkov S., Borisov V., Druzhanova V., Gnatovskaya I., Diev R., Kaznacheeva N., Levushkin D., Akinin D. Russian sawmill modernization (a case study). Part 2: improving the efficiency of wood chipping operations. *International Wood Products J.*, 2021, v. 12, no. 2, pp. 128–134. DOI: 10.1080/20426445.2020.1871276
- [6] Hosseini S.M., Peer A. Wood products manufacturing optimization: A survey. *IEEE Access*, 2022, v. 10, pp. 121653–121683. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3223053
- [7] Pásztozy Z., Gorbacheva G.A., Sanaev V.G., Mohácsiné I.R., Börcsök Z. *Sostoyanie i perspektivy ispol'zovaniya drevesnoy kory* [State and prospects of tree bark use]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, v. 24, no. 5, pp. 74–88. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-5-74-88
- [8] Kulagin E.P. *Tekhnologii ispol'zovaniya otkhodov i malotsennykh produktov khimicheskoy pererabotki drevesiny* [Technologies for the use of waste and low-value products of chemical wood processing]. Diss. Dr. Sci. (Tech.). Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 2001, 361 p.
- [9] Sandberg D., Haller P., Navi P. Thermo-hydro and thermo-hydro-mechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products. *Wood Material Science & Engineering*, 2013, no. 8(1), pp. 64–88. DOI: 10.1080/17480272.2012.751935
- [10] Kazymov D.S., Makhotina L.G., Nikandrov A.B., Kuznetsov A.G., Akim E.L. *Osobennosti pererabotki drevesiny Larix sibirica Ledeb (Pinaceae) v voloknistye polufabrikaty vysokogo vykhoda* [Features of Larix sibirica Ledeb wood processing into high yield fibrous semi-finished products]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant materials], 2021, no. 1, pp. 317–325. DOI: 10.14258/JCPRM.2021018472
- [11] Singh J., Ordoñez I. Resource recovery from post-consumer waste: important lessons for the upcoming circular economy. *J. of Cleaner Production*, 2016, no. 134, pp. 342–353. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.12.020
- [12] Faremi O.E., Sogbanmu T.O., Adeyemo O.K. How sawmill wastes impact surface water, sediment, macrobenthic invertebrates, and fish: a case study of the Lagos lagoon, Okobaba Area, South-western Nigeria. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, no. 193, pp. 1–13. DOI: 10.1007/s10661-021-09006-0
- [13] Zharskaya Ya.P., Fedosenko I.G. *Poluchenie toplivnykh granul s vysokimi kachestvennymi kharakteristikami iz shchepy nizkogo kachestva* [Production of fuel pellets with high quality characteristics from low-quality wood chips]. *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyaystvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyаемых ресурсов* [Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, environmental management and processing of renewable resources], 2023, no. 2(270), pp. 210–216. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-24
- [14] Dudziec P., Stachowicz P., Stolarski M.J. Diversity of properties of sawmill residues used as feedstock for energy generation. *Renewable Energy*, 2023, no. 202, pp. 822–833. DOI: 10.1016/j.renene.2022.12.002
- [15] Sandberg D., Gorbacheva G., Lichtenegger H., Niemz P., Teischinger A. Advanced Engineered Wood-Material Concepts. In: Niemz, P., Teischinger, A., Sandberg, D. (eds) *Springer Handbook of Wood Science and Technology*. Springer Handbooks. Springer, Cham, 2023, pp. 1835–1888. DOI: 10.1007/978-3-030-81315-4_35
- [16] Safin R.G., Ziatdinov R.R., Sotnikov V.G., Ryabushkin D.G., Akhmetova D.A. *Modelirovanie protsessy sushki drevesnykh otkhodov v ustanovke proizvodstva aktivirovannogo uglya* [Modeling the process of drying wood waste in an activated carbon production plant]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. [Systems. Methods. Technologies.], 2021, no. 4, pp. 79–86. DOI: 10.18324/2077-5415-2021-4-79-86
- [17] Valeev I.A. *Termicheskaya pererabotka otkhodov derevoobrabatyvayushchikh predpriyatij* [Thermal processing of waste from wood processing enterprises]. Diss. Cand. Sci. (Tech.). Kazan, Kazan State Technological University, 2006, 153 p.
- [18] Bulatov A.F. *Obosnovanie protsessy zagotovki i pererabotki biomassy dereva na tekhnologicheskuyu shchepu s tsel'yu resursosberezheniya* [Justification of the process of harvesting and processing wood biomass into technological chips for the purpose of resource saving]. Abst. Diss. Cand. Sci. (Tech.). St. Petersburg, St. Petersburg State Forestry Academy, 2001, 19 p.
- [19] Rejda M., Czardybon A., Ignasiak K., Robak J. Utilization of waste forest biomass: Pelletization studies of torrefied sawmill wood chips. Proc. of the 11th Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering EKO-DOK 2019, Polanica-Zdrój, Poland, April 8–10, 2019. *E3S Web of Conferences*, 2019, v. 100, p. 00068. DOI: 10.1051/e3sconf/201910000068
- [20] Amiamdhamen S.O., Adamopoulos S., Adl-Zarrabi B., Yin H., Norén J. Recycling sawmilling wood chips, biomass combustion residues, and tyre fibres into cement-bonded composites: Properties of composites and life cycle analysis. *Construction and Building Materials*, 2021, no. 297, p. 123781. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123781
- [21] Kowaluk G., Wronka A. Bonding of sawmill birch wood with selected biopolymer-based glues. *Annals of Warsaw University of Life Sciences SGGW Forestry and Wood Technology*, 2020, no. 109, pp. 32–36. DOI: 10.5604/01.3001.0014.3092
- [22] Mirski R., Dukarska D., Derkowski A., Czarniecki R., Dziurka D. By-products of sawmill industry as raw materials for manufacture of chip-sawdust boards. *J. of Building Engineering*, 2020, no. 32, p. 101460. DOI: 10.1016/j.job.2020.101460
- [23] Tuluzakov D.V., Spirin B.L. *Model' formirovaniya nasypnoy struktury paketa kompozitsionnogo materiala iz izmel'chennykh drevesnykh chastits* [Model of the formation of a bulk structure of a package of composite material from crushed wood particles]. *Lesnoy Vestnik / Forestry Bulletin*, 2018, v. 22, no. 2, pp. 95–103. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-2-95-103
- [24] Stepanov V.I., Mezina N.A. *Othody lesnoy promyshlennosti i ih ispol'zovanie v nacional'nom hozyaystve* [Forest industry waste and its use in the national economy]. *Vestnik Rossiyskogo ekonomicheskogo universiteta im. G.V. Plekhanova* [Bulletin of the Russian Economic University named after G.V. Plekhanov], 2012, no. 3, pp. 83–88.
- [25] Morozov D.K., Morozova I.V., Vasil'ev S.B. *Ispol'zovanie myagkikh otkhodov lesopileniya s cel'yu proizvodstva toplivnykh briketov* [Use of soft sawmill waste for the production of fuel briquettes]. *Resources and Technology*, 2018, v. 15, no. 3, pp. 1–28. DOI: 10.15393/j2.art.2018.4181
- [26] Parajuli R. Wood pellets versus pulp and paper: Quantifying the impacts of wood pellets on the pulpwood markets in the southeastern United States. *J. of Cleaner Production*, 2021, no. 317, p. 128384. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128384

- [27] Civitarese V., Acampora A., Sperandio G., Assirelli A., Picchio R. Production of wood pellets from poplar trees managed as coppices with different harvesting cycles. *Energies*, 2019, v. 12, no. 15, p. 2973. DOI: 10.3390/en12152973
- [28] Thiffault E., Barrette J., Blanchet P., Nguyen Q.N., Adjalle K. Optimizing quality of wood pellets made of hardwood processing residues. *Forests*, 2019, v. 10, no. 7, p. 607. DOI: 10.3390/f10070607
- [29] Quinteiro P., Tarelho L., Marques P., Martín-Gamboa M., Freire F., Arroja L., Dias A.C. Life cycle assessment of wood pellets and wood split logs for residential heating. *Science of the Total Environment*, 2019, v. 689, pp. 580–589. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.420
- [30] Sviridov L.T., Dorniyak O.R. *Reologiya drevesiny v protsessakh ee modifitsirovaniya* [Rheology of wood in the processes of its modification]. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2005, v. 166, pp. 239–241.
- [31] Mikheev M. V. *Samorasprostranyayushchiysya vysokotemperaturnyy sintez materialov na osnove disilitsida molibdena v usloviyakh davleniya so sdvigom* [Self-propagating high-temperature synthesis of materials based on molybdenum disilicide under shear pressure conditions]. Diss. Cand. Sci. (Tech.). Chernogolovka, Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of Russian Academy of Sciences, 2018, 141 p.
- [32] Kamperidou V. Quality Analysis of Commercially Available Wood Pellets and Correlations between Pellets Characteristics. *Energies*, 2022, v. 15, no. 8, p. 2865. DOI: 10.3390/en15082865
- [33] Lehmann B., Schröder H.W., Wollenberg R., Repkeet J.U. Effect of miscanthus addition and different grinding processes on the quality of wood pellets. *Biomass and bioenergy*, 2012, no. 44, pp. 150–159. DOI: 10.1016/j.biombioe.2012.05.009
- [34] Anciferov V.N., Perel'man V.E. *Mekhanika processov pressovaniya poroshkovykh i kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of the processes of pressing powder and composite materials]. Moscow: Graal', 2001, 628 p.
- [35] Buchackiy L.M., Stolin A.M. *Iysokotemperaturnaya reologiya SVS-materialov* [High temperature rheology of SVS materials]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [J. of Engineering Physics], 1992, v. 63, no. 5, pp. 593–604.
- [36] Petrosyan G.L. *Plasticheskoe deformirovanie poroshkovykh materialov* [Plastic deformation of powder materials]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 152 p.
- [37] Nielsen S.K., Rezaei H., Mandø M., Sokhansanj S. Constitutive modelling of compression and stress relaxation in pine pellets. *Biomass and Bioenergy*, 2019, no. 130, p. 105370. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.105370
- [38] Pietsch W.B. *Agglomeration processes: phenomena, technologies, equipment*. Weinheim: John Wiley & Sons, 2008. DOI: 10.1002/9783527619801
- [39] Chibirev O., Kunitskaya O., Davtyan A. *Analiz issledovaniy protsessa briketirovaniya otkhodov lesopererabotki na gidravlicheskom pressovom oborudovanii* [The analysis of research of wood processing wastes briquetting by using hydraulic press equipment]. *Resources and Technology*, 2019, v. 16, no. 2, pp. 97–118. DOI: 10.15393/j2.art.2019.4522

The work was carried out under the state order within the framework of the cooperation agreement between the Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Problems named after A.G. Merzhanov of the Russian Academy of Sciences (ISMAN) and the Bauman Moscow State Technical University (National Research University) (Mytishchi branch). The equipment and methods of the laboratory No. 7 «Plastic deformation of materials» (ISMAN) and the Centre for Collective Use of Scientific Equipment «Centre for Physical and Mechanical Testing of Wood» (CCP CFMID) of Bauman Moscow State Technical University (Mytishchi branch) were used for the work.

Authors' information

Mikheev Maksim Valer'evich✉ — Cand. Sci. (Tech.), Researcher, Laboratory No. 7 «Plastic Deformation of Materials» Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of Russian Academy of Sciences (ISMAN), mmixeev00@mail.ru

Komina Alisa Vadimovna — student of the BMSTU (Mytishchi branch), kominaalisa005@gmail.com

Gorbacheva Galina Aleksandrovna — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), gorbacheva@bmstu.ru

Kalinina Alena Anatol'evna — Senior Lecturer of the BMSTU (Mytishchi branch), kalinina@mgul.ac.ru

Bolotskaya Anastasia Vadimovna — Cand. Sci. (Tech.), Researcher, Laboratory No. 7 «Plastic Deformation of Materials» Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of Russian Academy of Sciences (ISMAN), moon@ism.ac.ru

Sanaev Victor Georgievich — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Director of Mytishchi Branch of the BMSTU, vgsanaev@bmstu.ru

Stolin Aleksandr Moiseevich — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of Laboratory No. 7 «Plastic Deformation of Materials» Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of Russian Academy of Sciences (ISMAN), amstolin@ism.ac.ru

Received 22.10.2023.

Approved after review 20.12.2023.

Accepted for publication 06.02.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
 Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
 Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
 The authors declare that there is no conflict of interest