

УДК 674.81

DOI: 10.15393/j2.art.2019.4522

Обзор

Анализ исследований процесса брикетирования отходов лесопереработки на гидравлическом прессовом оборудовании

Олег В. Чибирев¹, Ольга А. Куницкая^{2,*} и Армен Б. Давтян³

¹ Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова, Россия, 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8; E-Mail: bastrikov@gmail.com (Олег Чибирев)

² Якутская государственная сельскохозяйственная академия, Россия, 677007, г. Якутск, ш. Сергеляхское, 3-й км, д. 3; E-Mail: ola.ola07@mail.ru (Ольга Куницкая)

³ Братский государственный университет, Россия, 665709, Иркутская область, г. Братск, ул. Макаренко, д. 40; E-Mail: armen_davtyan_2019@inbox.ru (Армен Давтян)

* Автор, с которым следует вести переписку; E-Mail: ola.ola07@mail.ru;
Tel.: +7-921-324-2547

Получена: 6 Апреля 2019 / Принята: 4 июня / Опубликовано: 26 июня 2019

Аннотация: Способ утилизации опилок и других отходов лесопереработки путём производства топливных брикетов находит всё большее применение в промышленности. Диверсификация продукции лесопереработки является приоритетным направлением развития промышленности, в одном ряду с повышением энергоэффективности производства. Современных работ по тематике непосредственно брикетирования известно сравнительно мало, из фундаментальных работ в этой области следует отметить монографию Н. А. Модина (вышла в 1971 г.). Очевидно, что промышленность за это время сделала шаг вперёд, появились новые модели высокопроизводительных прессов, главным образом гидравлических; кроме того, изменились социально-экономические условия. Таким образом, дальнейшие исследования в области брикетирования отходов лесопереработки являются актуальными как для теории, так и для практики лесозаготовительного производства. Известны математические модели, описывающие формирование пеллет из опилок в фильерах открытого типа; для этого случая проработаны вопросы оценки деформативных свойств прессуемой древесной массы. Известны результаты теоретических

и экспериментальных исследований по виброударному уплотнению измельчённой коры и опилок. Опубликованы результаты ряда экспериментальных исследований по брикетированию опилок и коры с использованием штемпельных прессов с открытой матрицей. Вопросы уплотнения измельчённых древесных материалов в закрытой матрице проработаны частично. Требуется разработать и исследовать математические модели прессования древесной массы с использованием гидравлического прессового оборудования, уточняющие представления о деформативных свойствах измельчённой древесины и коры и развивающие теорию уплотнения древесных материалов, позволяющие на практике подбирать рациональные параметры процесса брикетирования в закрытой матрице с учётом свойств сырья.

Ключевые слова: отходы деревообработки, брикетирование, прессование, матрица закрытая.

DOI: 10.15393/j2.art.2019.4522

Review

The analysis of research of wood processing wastes briquetting by using hydraulic press equipment

Oleg Chibirev¹, Olga Kunitskaya^{2,*} and Armen Davtyan³

¹ Voronezh state forest engineering University named after G. F. Morozov, Russia, 394087, Voronezh region, Voronezh, 8, Timiryazev str.; E-Mail: bastrikov@gmail.com (Oleg Chibirev)

² Yakut state agricultural Academy, Russia, 677007, Yakutsk, sh. Sergelyakhskoe, 3 km, building 3; E-Mail: ola.ola07@mail.ru (Olga Kunitskaya)

³ Bratsk state University, Russia, 665709, Irkutsk region, Bratsk, Makarenko str., 40; E-Mail: armen_davtyan_2019@inbox.ru (Armen Davtyan)

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: ola.ola07@mail.ru;
Tel.: +7-921-324-2547

Received: 6 April 2019 / Accepted: 4 June 2019 / Published: 26 June 2019

Abstract: The method of utilization of sawdust and other wastes of wood processing through the production of fuel briquettes is increasingly used in the industry. Diversification of timber processing products is a priority for the development of the industry, along with improving the energy efficiency of production. There are few articles about briquetting, the only monograph by N. Ah. Modin was published in 1971. It is obvious that the industry has taken a step forward during this time, new models of high – performance presses, mainly hydraulic, have appeared, and socio-economic conditions have changed. Thus, further research in the field of briquetting of wood processing waste is relevant both for the theory and practice of logging. Mathematical models describing formation of pellets from sawdust in open-type dies are known; the questions of assessing the deformative properties of the pressed wood mass are worked out. The results of theoretical and experimental studies on vibro-shock compaction of crushed bark and sawdust are known. The results of a number of experimental studies on briquetting sawdust and bark using stamp presses with an open matrix are published. The issues of compaction of crushed wood materials in a closed matrix have been worked out partially. Mathematical models of pressing wood mass using hydraulic pressing equipment should be developed and investigated to clarify the ideas about the deformative properties of crushed wood and bark and to develop the theory of compaction of wood materials. This will allow in practice select the rational parameters

of the briquetting process in a closed matrix, taking into account the properties of raw materials.

Keywords: wood waste, briquetting, pressing, closed matrix.

1. Введение

Вопросами уплотнения цельной и измельчённой древесины занимались многие учёные, среди них Н. А. Модин, П. Н. Хухрянский, В. А. Шамаев, В. И. Огарков, В. И. Пятакин и др. Большой вклад в исследование напряжённо-деформированного состояния древесины при воздействии различных типов нагрузок внесли отечественные учёные П. Н. Хухрянский, Б. М. Буглай, В. В. Памфилов, В. А. Баженов, В. Н. Быковский, Ф. П. Белянкин, В. Ф. Яценко, Е. К. Ашкенази и др. Вопросы энергетического использования отходов и пеллетного производства освещены в трудах О. Д. Мюллера и В. И. Мелехова.

Для дальнейшего развития теории уплотнения древесных материалов необходимы оценки модуля деформации, модуля сдвига и коэффициента Пуассона конгломерата хаотически ориентированных древесных частиц; зависимости, учитывающие влияние плотности конгломерата на его деформативные свойства. Это позволит учесть влияние влажности и средней крупности материала, процентного содержания измельчённой коры в прессуемом материале, давления прессования на прочность и плотность брикетов, получаемых на гидравлическом прессовом оборудовании с закрытой матрицей, и обосновать рациональные параметры процесса брикетирования.

2. Материалы и методы

Брикеты представляют собой плотные куски, полученные из сыпучей древесины либо, реже, измельчённой коры путем её прессования. В настоящее время распространены технологии брикетирования без применения искусственных связующих веществ, т. к. при этом получается экологически чистый брикет — в качестве естественного связующего при брикетировании выступает лигнин, выделяющийся из клеток древесины под действием давления и температуры [1—3].

Технологические процессы брикетирования могут включать следующие основные операции [4]: транспортировку сырья к брикетной установке; измельчение крупных древесных отходов; сепарацию (сортировку по крупности); сушку; термообработку; прессование (формирование брикета); хранение и транспортировку к месту потребления.

Перечисленные выше операции применяются не во всех технологических процессах брикетирования.

К топливным брикетам предъявляются определённые требования, регламентированные стандартами. Например, в таблице 1 представлены технические требования к топливным брикетам, разработанные в России [4].

Следует признать, что за рубежом вопросам сертификации биотоплива уделяется больше внимания. В различных странах были в разное время введены различные стандарты [5—7], например: США — Standard Regulations & Standards for Pellets in the US: The PFI; Великобритания — The British BioGen Code of Practice for biofuel; Швейцария — SN 166000; Швеция — SS 187120; Австрия — ONORM M 7135; Германия — DIN 51731 и DIN plus.

Таблица 1. Технические требования к топливным брикетам [4]

Table 1. Technical requirements for fuel briquettes [4]

Показатель	Нормы для сортов		
	Высший сорт	I сорт	II сорт
Влажность, не более, %	5	5—10	10—18
Зольность, не более, %	5	5	5
Низшая удельная теплота сгорания, МДж/кг	16,7—23	14,6—16,7	13,8—14,6
Плотность, не менее, кг/м ³	950	950	950
Массовая доля мелочи (куски размером менее 25 мм), не более, %	5	5	5
Длина, мм	80—400		
Диаметр, мм	40—90		

В 2011 г. введены новые стандарты качества биотоплива EN 14961-2 [8]. Сведения из стандарта приведены в таблице 2.

Резюмируя сведения таблицы 2, отметим, что топливные брикеты должны иметь плотность свыше 1 г/см³, влажность до 15 % и зольность в пределах 0,7—3 %, допускается содержание в брикетах коры.

Низшую теплоту сгорания оценим по формуле Д. И. Менделеева [9]:

$$Q_H = 339C + 1031H - 109O - 25W, \quad (1)$$

где C — процентное содержание углерода в коре по массе, H — процентное содержание водорода, O — процентное содержание кислорода, W — относительная влажность материала брикета.

По формуле (1) при $C = 42 \%$, $H = 8 \%$, $O = 50 \%$ получим график, представленный на рисунке 1.

График показывает, что при влажности ниже 15 % требование к минимальной теплотворной способности брикетов выполняется автоматически [10].

Основным оборудованием, определяющим производительность участка по производству брикетов, являются прессы [11]. Известны прессы для брикетирования древесных отходов следующих конструкций: штемпельные с открытой матрицей; копровые; шнековые; гидравлические; ротационные; ударно-механические.

Копровые и ротационные прессы не получили распространения.

В таблице 3 кратко изложены сведения о преимуществах и недостатках распространённых типов прессов для брикетирования [11], [12], [13].

Таблица 2. Требования к топливным брикетам по стандарту EN 14961-2 [8]

Table 2. Requirements for fuel briquettes according to EN 14961-2 [8]

Показатель	Единица измерения	Класс брикета		
		А		В
		1	2	
Сырьё	—	Стволовая древесина и её отходы, не подвергавшиеся химической обработке	Вся биомасса дерева, за исключением корней; стволовая древесина; лесосечные отходы; кора; отходы лесопереработки, не подвергавшиеся химической обработке	Плантационная древесина; отходы лесопереработки без ограничений; древесный утиль
Размеры (длина × ширина × высота)	мм			
Влажность	%	< 12	< 15	< 15
Зольность	%	< 0,7	< 1,5	< 3,0
Плотность	г/см ³	> 1	> 1	> 0,9
Теплотворная способность	МДж/кг	> 15,5	> 15,3	> 14,9
Максимальное содержание примесей				
Азот	%	0,3	0,5	1
Сера	%	0,05	0,05	0,05
Хлор	%	0,02	0,02	0,03
Мышьяк	мг/кг	1	1	1
Кадмий	мг/кг	0,5	0,5	0,5
Хром	мг/кг	10	10	10
Медь	мг/кг	10	10	10
Свинец	мг/кг	10	10	10
Ртуть	мг/кг	0,1	0,1	0,1
Никель	мг/кг	10	10	10
Цинк	мг/кг	100	100	100

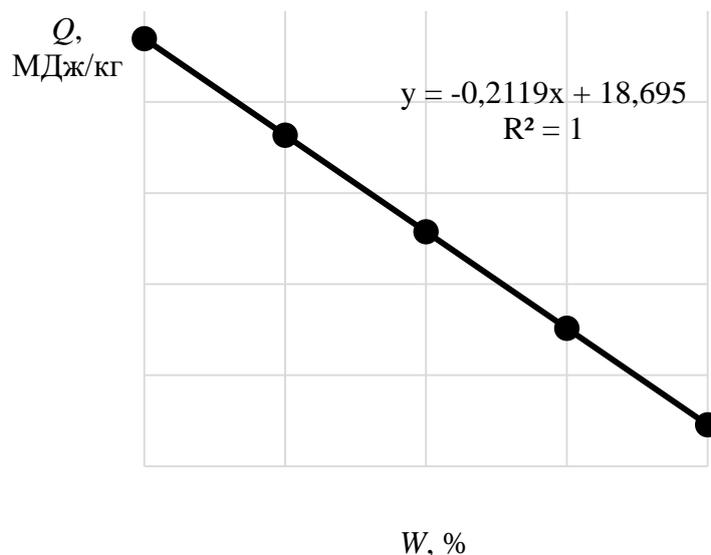


Рисунок 1. Рабочая теплотворная способность древесины в зависимости от относительной влажности

Figure 1. Working calorific value of wood depending on relative humidity

Гидравлические прессы считаются наиболее надёжными и безопасными [14].

Операция брикетирования на гидравлических прессах осуществляется следующим образом (схема представлена на рисунке 2). Загрузочный шнек (2) подаёт материал, находящийся в бункере (1), в наполнитель, продолжительность работы загрузочного шнека взаимосвязана с системой автоматического дозирования материала. После окончания загрузки наполнителя и остановки загрузочного шнека поршень наполнителя (3) производит предварительное сжатие материала, находящегося в камере наполнителя (4). Главный прессующий поршень (6) передвигает предварительно сжатый материал в одну из двух камер пресс-формы (5) и сжимает материал в плотный брикет. В течение этого этапа выталкиватели, установленные параллельно главному цилиндру, выталкивают готовый брикет из второй камеры пресс-формы через специальные отверстия в передней панели. Поршень наполнителя поднимается вверх. Загрузочный шнек начинает подачу следующей порции прессуемого материала. Прессующий цилиндр (7) возвращается в исходное положение, пресс-форма перемещается (4), после чего последовательность операций, следующих после окончания загрузки наполнителя, повторяется.

В таблице 4 приведены ориентировочные сведения, дающие представление о рентабельности производства биотоплива с использованием гидравлического пресса.

Качество получаемого брикета зависит от многих факторов, основными из которых являются: химический состав и физическое состояние прессуемого материала, его влажность, фракционный состав и величина брикетируемых частиц, температура нагрева перед прессованием, усилие прессования, время выдержки под давлением [11]. Несмотря на

распространение процесса брикетирования в лесоперерабатывающей промышленности, систематизированных научных сведений о нём сравнительно мало. Среди отечественных исследований необходимо отметить монографию [11], изданную ещё в 1971 г.

Таблица 3. Преимущества и недостатки различных конструкций прессов

Table 3. Advantages and disadvantages of different press designs

Тип пресса	Недостатки	Достоинства
Шнековый	Высокое потребление электроэнергии Износ подающего шнека Необходимость постоянного регулирования шнекового зазора во время работы пресса Необходимость охлаждения брикетов после прессования и нагрева Требуется высококвалифицированный персонал для обслуживания пресса	Привлекательный вид изготовленных брикетов Высокая плотность брикетов Брикеты влагоустойчивы
Гидравлический	Сравнительно высокие капитальные затраты на организацию производства	Высокая надёжность в сравнении со шнековыми прессами Отсутствие необходимости менять шнек или выполнять наплавку на него Низкое потребление электроэнергии Не надо охлаждать брикеты Отсутствие необходимости устанавливать системы дымоудаления Возможность мгновенного запуска оборудования Возможность брикетирования сырья широкого диапазона фракций
Ударно-механический	Возможность брикетировать только однородное сырьё Сырьё для брикетирования должно быть влажностью 12—14 %	Высокая производительность (до 3000 кг/ч)
Штемпельный с открытой матрицей	Ограничение конечной плотности получаемых брикетов из-за незначительной величины подпора прессуемой массы в коротких открытых матрицах Возможность брикетировать только однородное сырьё	Низкая стоимость пресса

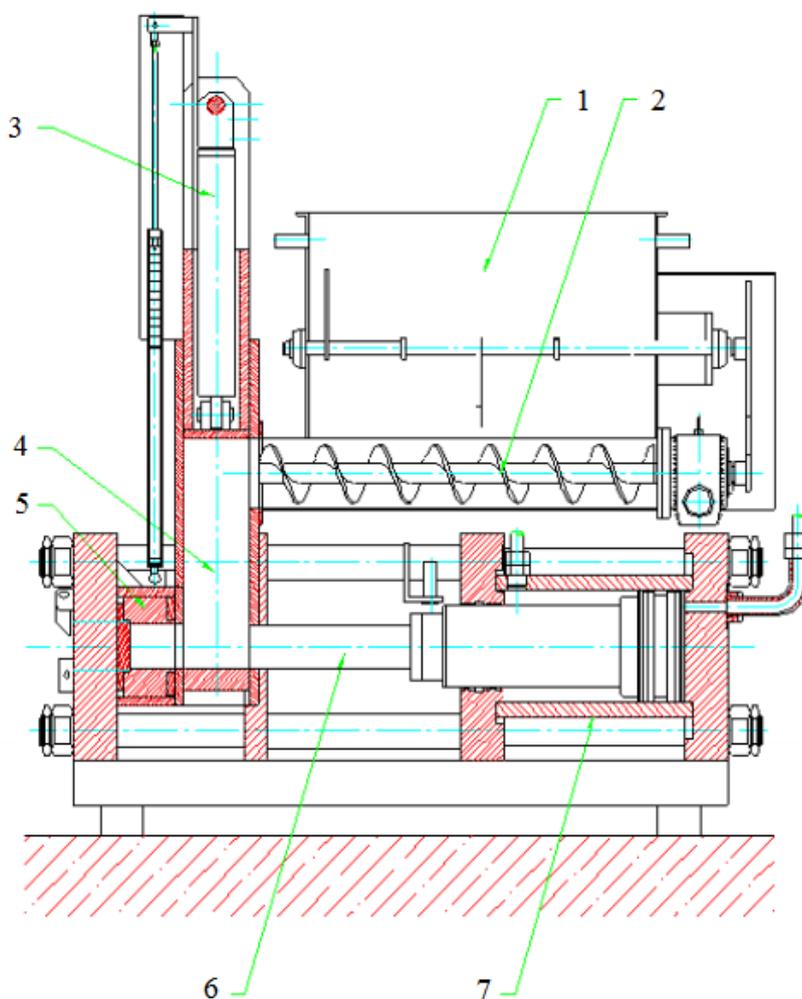


Рисунок 2. Схема гидравлического пресса: 1 — бункер, 2 — загрузочный шнек, 3 — поршень наполнителя, 4 — камера наполнителя, 5 — пресс-форма, 6 — главный прессующий поршень, 7 — прессующий цилиндр

Figure 2. Scheme of hydraulic press: 1 — hopper, 2 — loading screw, 3 — filler piston, 4 — filler chamber, 5 — mold, 6 — main pressing piston, 7 — pressing cylinder

Таблица 4. Оценка рентабельности продукции брикетного производства

Table 4. Evaluation of profitability of briquette production

Технические параметры	Единица измерения	Количество
Задаваемые параметры		
Количество брикетов в час	шт/ч	660
Номинальная потребляемая электроэнергия	кВт/ч	30
Вес брикета	кг	0,83
Количество рабочих часов в сутки	ч	22
Количество рабочих дней в месяце	дн	26
Вычисляемые параметры		
Количество произведенных тонн в месяц	т	313
Количество отработанных часов в месяц	ч	572
Экономические параметры	RUR	EUR
Задаваемые параметры		
Цена электроэнергии за кВт	2	0,03
Цена упаковочного материала на 1 т брикетов	280	4,31
Цена сырья на 1 т брикетов	400	6,15
Брутто-зарплата рабочим на 1 т брикетов	200	3,08
Вычисляемые расходы за месяц		
Электроэнергия	34320	528,00
Упаковочный материал	87640	1348,31
Брутто-зарплата рабочим	62600	963,08
Сырьё	125200	1926,15
Расходы на сервис оборудования (приблизительно 1 EUR/ч)	37180	572,00
Дополнительные расходы		
Аренда помещения в месяц	0	0
Рентабельность производства	RUR	EUR
Цена брикетов за тонну	6500	100
Реализация в месяц	2034500	31300
Себестоимость 1 т брикетов	1108,43	17,05
Себестоимость производства в месяц	346940	5337,54
Прибыль от реализации 1 т брикетов	5391,57	82,95
Прибыль в месяц	1687561,41	25963,35

Авторы в публикации [11] приводят результаты экспериментальных исследований прессования опилок и измельчённой коры на штемпельных и гидравлических прессах.

На рисунке 3 представлена зависимость плотности брикетов от удельного давления прессования. Брикеты получены из подогретых до 80 °С опилок влажностью 11 % на штемпельном прессе Ганц.

На графике зависимость плотности от давления прессования близка к линейной, брикеты с плотностью свыше 1 г/см^3 получались при давлении прессования от 80 МПа.

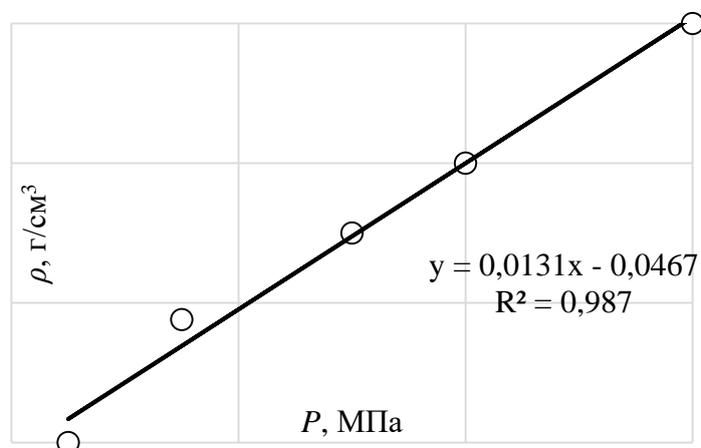


Рисунок 3. Влияние давления прессования на плотность брикетов [11]

Figure 3. Influence of pressing pressure on the density of briquettes [11]

На рисунке 4 представлена зависимость плотности брикетов от удельного давления прессования. Брикеты получены в лабораторных условиях из опилок и измельченной коры при комнатной температуре на штемпельном прессе УИМ-50М.

Меньшие значения плотности брикетов, по сравнению со случаем прессования на прессе Ганц, вызваны отсутствием прогрева материала. Для получения брикетов с плотностью больше 1 г/см^3 с использованием штемпельного прессы требуется удельное давление прессования $> 150 \text{ МПа}$.

По графикам на рисунке 4 можем заключить, что при равных давлениях плотность брикетов из коры больше плотности брикетов из опилок на величину до 15 %.

На рисунке 5 проиллюстрировано влияние содержания измельченной коры в смеси с опилками на прочность брикетов при изгибе (брикеты получены на штемпельном прессе при комнатной температуре материала, влажность материала составляла 8—10 %, давление прессования 100 МПа).

Как показывает график, брикеты с включением коры и полностью корьевые брикеты обладают меньшей прочностью по сравнению с брикетами из опилок без коры. При давлении прессования 100 МПа прочность на изгиб у брикетов из опилок составляет порядка 3,5 МПа, у брикетов из коры — 1,75 МПа. Отметим нелинейное влияние процентного содержания коры на прочность брикетов. На рисунке 6 представлены сведения о влиянии плотности брикетов из опилок и из коры на их изгибную прочность (брикеты получены на штемпельном прессе при комнатной температуре, влажность материала составляла 8—10 %, давление прессования варьировалось).

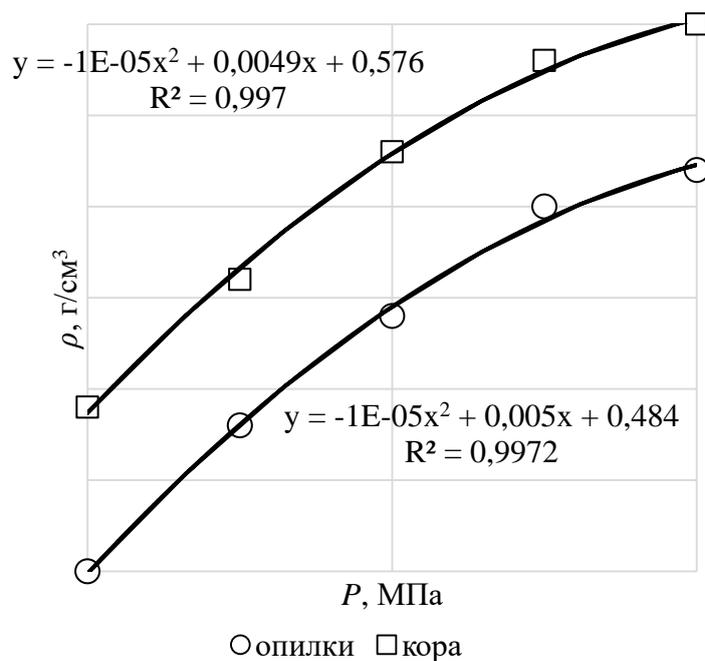


Рисунок 4. Влияние давления прессования на плотность брикетов [11]

Figure 4. Influence of pressing pressure on the density of briquettes [11]

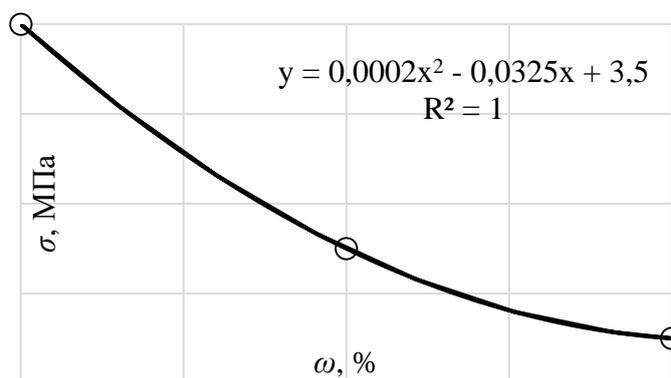


Рисунок 5. Влияние массовой доли коры в сырье для брикетирования на прочность брикетов [11]

Figure 5. Influence of the mass fraction of bark in the raw material for briquetting on the strength of briquettes [11]

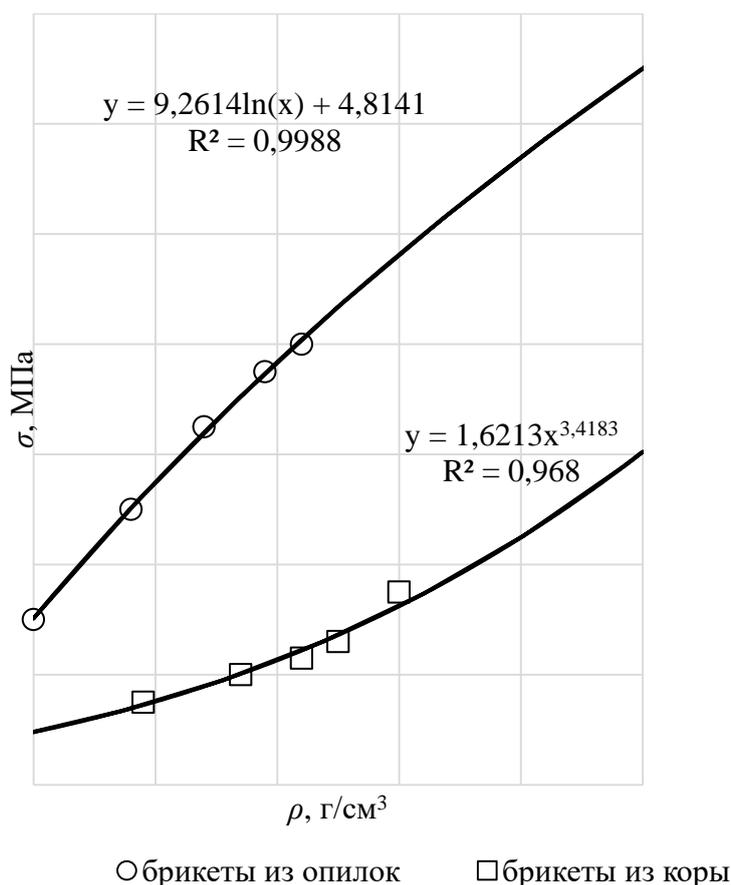
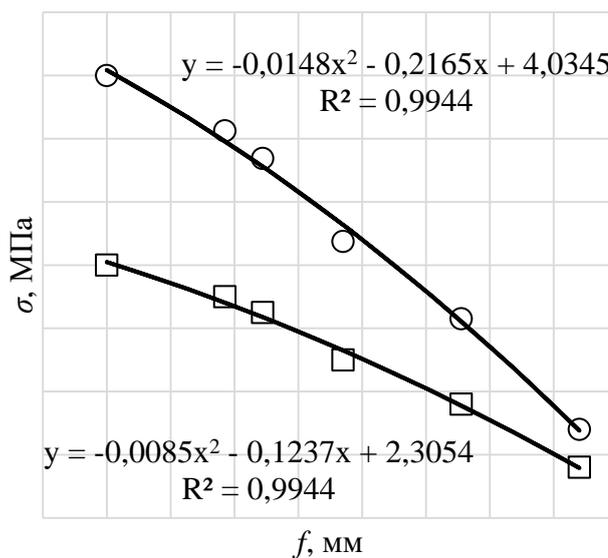


Рисунок 6. Влияние плотности брикетов из опилок и коры на их прочность [11]

Figure 6. Influence of density of sawdust briquettes and bark on their strength [11]

Во всём представленном диапазоне плотности прочность корьевых брикетов приблизительно вдвое ниже прочности брикетов из опилок.

На рисунке 7 представлены графики, иллюстрирующие влияние крупности экспериментального материала на прочность получаемых брикетов. В работе [11] не указывается, при каких значениях давления прессования получены брикеты, подвергнутые испытаниям на прочность. Таким образом, однозначно заключить, вызвано ли заметное снижение прочности брикетов большей жёсткостью крупной фракции прессуемого материала и, как следствие, меньшей плотностью брикета при постоянном давлении прессования, либо структурой брикета из сырья крупной фракции, либо сочетанием этих двух причин, затруднительно.



○ брикеты из опилок и щепы □ брикеты из коры

Рисунок 7. Влияние средней крупности сырья на прочность брикетов [11]

Figure 7. The influence of the average particle size of the raw material on the strength of the briquettes [11]

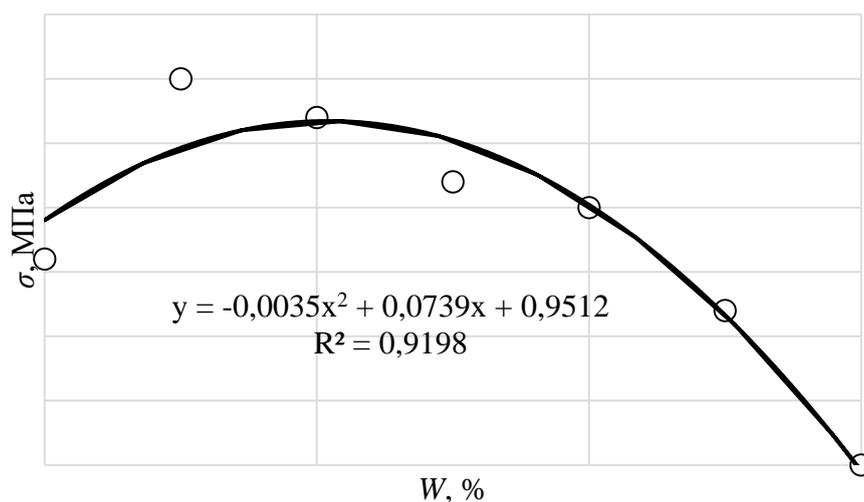


Рисунок 8. Влияние влажности опилок на прочность брикетов [11]

Figure 8. The effect of humidity on the durability of sawdust briquettes [11]

Можно предположить, что брикетировать сырьё крупнее 5 мм не целесообразно. На рисунке 8 проиллюстрировано влияние влажности опилок на прочность получаемых брикетов. Наилучшие показатели достигаются при прессовании опилок с влажностью

в пределах 5—10 %. На схожем диапазоне влажности брикета настаивают и стандарты качества биотоплива.

Отметим снижение прочности брикетов при влажности материала менее 5 %. Как и в случае с фракционным составом, затруднительно дать однозначное заключение, чем обусловлено снижение прочности: меньшей плотностью брикетов из более жёстких сухих опилок либо самой структурой брикетов.

Также обращает на себя внимание область 5—15 % влажности, в которой, предположительно, находится оптимальное значение влажности опилок с точки зрения прочности брикета.

Резюмируя рассмотренные экспериментальные сведения, отметим недостаток данных, полученных по результатам многофакторных экспериментов с учётом взаимодействия различных факторов (плотности брикета, включения коры, крупности прессуемого материала и его влажности, давления прессования). По этой причине считаем целесообразным проведение многофакторного эксперимента для получения математических моделей, позволяющих прогнозировать плотность и прочность брикетов при варьировании параметров прессуемого материала. При этом в плане эксперимента необходимо исходить из возможности получения регрессионных моделей старшего порядка, что подтверждают данные, полученные ранее (рисунки 3—8).

Одним из важнейших параметров, характеризующих массив материала при уплотнении, является модуль деформации [16—19].

При прессовании материал претерпевает большие относительные деформации, меняются его физико-механические свойства, в т. ч. и модуль деформации. Нами для оценки модуля деформации использованы данные работы [11], представленные на рисунке 9.

Графики на рисунке 9 показывают, что в общем виде зависимости давления прессования P от плотности брикетов ρ можно описать степенными функциями:

$$P = A \cdot \rho^B, \quad (2)$$

где A, B — числовые коэффициенты.

Модуль деформации при уплотнении, по определению, представляет собой отношение:

$$E = \frac{dP}{d\varepsilon}, \quad (3)$$

где ε — относительная деформация сжатия.

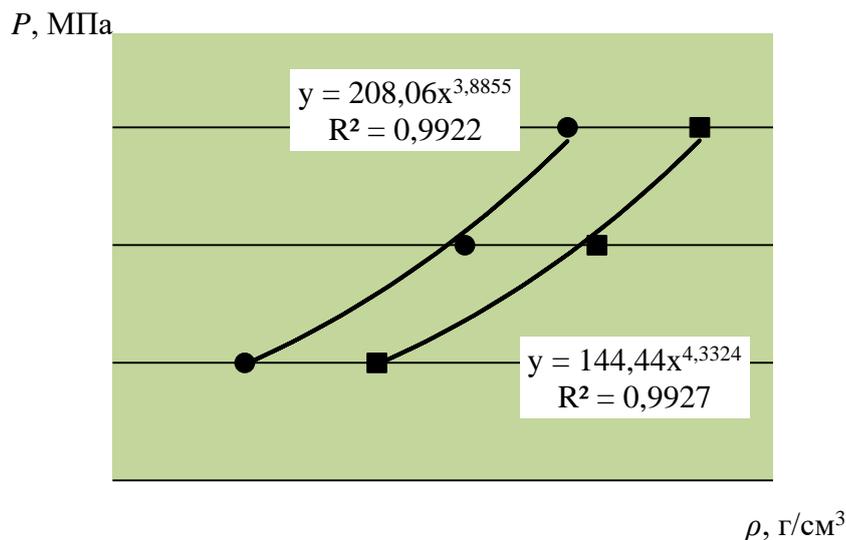


Рисунок 9. Зависимость давления прессования от требуемой плотности брикетов (штемпельный пресс) (круглые маркеры — опилки, квадратные маркеры — кора) [11]

Figure 9. Correlation between the pressure of pressing and the required density of briquettes (stamp press) (round markers — sawdust, square markers — bark) [11]

С учётом зависимости для плотности

$$\rho = \rho_0 \frac{1}{1 - \varepsilon}, \quad (4)$$

где ρ_0 — начальная плотность материала, после дифференцирования получим из выражения (3):

$$E = \frac{AB}{1 - \varepsilon} \cdot \left(\frac{\rho_0}{1 - \varepsilon} \right)^B. \quad (5)$$

Результаты расчёта по формуле (5) с учётом значений коэффициентов (рисунок 9) представлены на рисунке 10.

Отмечена необходимость проведения дальнейших экспериментальных исследований с целью анализа влияния большего числа факторов на модуль деформации. При этом в плане эксперимента необходимо исходить из возможности получения регрессионных моделей второго порядка, что следует из вида кривых на рисунке 10. Известны и теоретические сведения об оценке деформативных свойств прессуемого материала. В работе [20] представлены таблицы, содержащие результаты теоретического расчёта упругих постоянных

конгломерата древесных частиц различных пород древесины. Данные получены с использованием методов осреднения Фойгта, Ройсса и Хилла, рассмотренных в работах [19], [21].

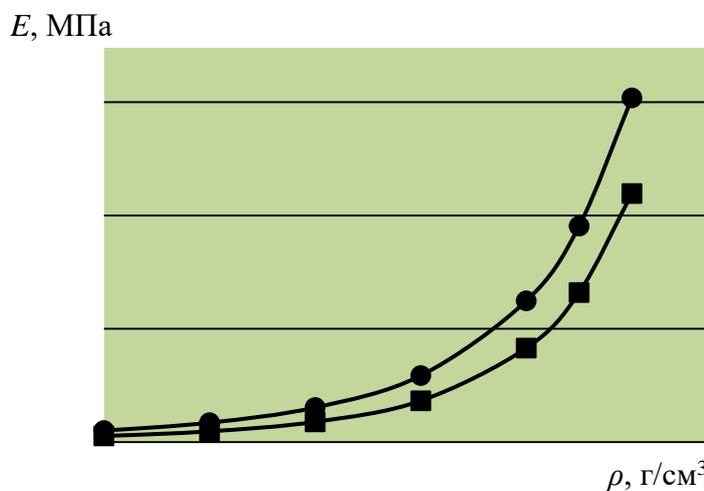


Рисунок 10. Зависимость модуля деформации от относительной деформации брикетов (штемпельный пресс) (круглые маркеры — опилки, квадратные маркеры — кора)

Figure 10. Correlation between the strain modulus and the relative deformation of briquettes (stamp press) (round markers — sawdust, square markers — bark)

Таблица 5. Осреднённые упругие постоянные конгломерата древесных частиц [20]

Table 5. The averaged elastic constants of the conglomerate of wood particles [20]

Порода древесины	Осреднение	E , МПа	ν	G , МПа
Сосна	Метод Фойгта	2136,7	0,27	1240,0
	Метод Ройсса	486,5	0,20	256,6
	Метод Хилла	1311,6	0,24	748,3
Берёза	Метод Фойгта	2918,9	0,30	1647,7
	Метод Ройсса	982,4	0,19	503,8
	Метод Хилла	1950,7	0,25	1075,8

Данные, представленные в таблице 5, противоречивы. Частицы прессуемого материала ориентированы в пространстве прессформы хаотически, вследствие чего брикетируемый материал должен отличаться изотропией деформативных свойств. Однако условие

изотропности $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ для данных, представленных в таблице 5, не выполняется. Это обусловлено тем, что осреднение выполнено с учётом разброса частиц только в плоскости, нормальной к направлению прессования, что принято при описании прессования стружечных плит.

4. Обсуждение и заключение

Анализируя результаты вышеприведённого анализа, можем отметить, что изучаемый вопрос проработан сравнительно мало.

В соответствии с действующим европейским стандартом топливные брикеты должны иметь плотность свыше 1 г/см^3 , влажность — до 15 % и зольность — в пределах 0,7—3 %, допускается содержание в брикетах коры. С учётом ограничения по влажности теплотворная способность брикетов не ниже требуемой стандартом. Технические требования к биотопливу, разработанные в России, в целом соответствуют схожим характеристикам топливных брикетов.

Известные теоретические данные, относящиеся к оценке деформативных свойств брикетизируемого древесного материала, противоречивы.

Для разработки адекватных математических моделей брикетирования измельчённой древесной массы необходимы дальнейшие экспериментальные исследования с целью анализа влияния большего числа факторов на деформативные свойства опилок и измельчённой коры при прессовании. При этом в плане эксперимента необходимо исходить из возможности получения регрессионных моделей второго порядка.

При исследовании прочности и плотности брикетов представляется целесообразным включить в план эксперимента в качестве управляемых факторов влажность и среднюю крупность материала, плотность брикета, процентное содержание измельчённой коры в экспериментальном материале, потребное удельное давление прессования. В плане эксперимента необходимо исходить из возможности получения регрессионных моделей второго порядка.

С учётом действующих стандартов качества брикетов, а также имеющихся экспериментальных данных, представленных в исследованиях, выполненных ранее, следует ориентироваться на диапазоны изменения управляемых факторов: влажность экспериментального материала от 5 до 15 %, средняя крупность от 1 до 5 мм, содержание коры от 0 до 100 %. Экспериментальный пресс должен обеспечивать давление прессования до 150—200 МПа.

Благодарности

Работа выполнена в рамках научной школы Якутской государственной сельскохозяйственной академии «Инновационные разработки в области лесозаготовительной

промышленности и лесного хозяйства», возглавляемой доктором технических наук, профессором Григорьевым Игорем Владиславовичем. Авторы выражают благодарность И. В. Григорьеву за эффективную деятельность по созданию коллективов единомышленников для решения актуальных задач лесопромышленного комплекса.

Список литературы

1. Pham Khan Toan, Nguyen Duc Cuong, Nguyen Thi Quy and Phi Kim Sinh Application of briquetting technology to produce briquettes from agricultural residues and by products. World Renewable Energy Congress VI. — 2000. — P. 1416—1419.
2. Particle density determination of pellets and briquettes / F. Rabier, M. Temmerman, T. Bohm, H. Hartmann, P. Daugbjerg, J. Rathbauer [et al.] // Biomass and Bioenergy. — 2006. — № 30. — P. 954—963.
3. Effect of biomaterial characteristics on pelletizing properties and biofuel pellet quality / R. Samuelsson, M. Thyrel, M. Sjöström, T. Lestander // Fuel Processing Technology. — 2009. — № 90. — P. 1129—1134.
4. *Гомонай, М. В.* Производство топливных брикетов. Древесное сырьё, оборудование, технологии, режимы работы / М. В. Гомонай. — Москва : Изд-во МГУЛ, 2006. — 68 с.
5. Industrial processes for biomass drying and their effects on the quality properties of wood pellets / M. Stahl, K. Granstrom, J. Berghel, R. Renstrom // Biomass and Bioenergy. — 2004. — № 27. — P. 621—628.
6. Comparison of quality and production cost of briquettes made from agricultural and forest origin biomass / M. Stolarski, S. Szczukowski, J. Tworkowski, M. Krzyzaniak, P. Gulczynski, M. Mleczek // Renewable Energy. — 2013. — № 57. — P. 20—26.
7. *Takeshita, T.* A strategy for introducing modern bioenergy into developing Asia to avoid dangerous climate change / T. Takeshita // Applied Energy. — 2009. — № 86. — P. 222—232.
8. ГОСТ Р 55115-2012 (EN 14961-3:2011) Биотопливо твёрдое. Технические характеристики и классы топлива. Ч. 3. Древесные брикеты для непромышленного использования.
9. *Акимова, Т. А.* Экология. Природа — Человек — Техника : учебник для студ. вузов / Т. А. Акимова, А. П. Кузьмин, В. В. Хаскин. — Москва : Экономика, 2007. — 510 с.
10. *Чибирев, О. В.* Аппроксимированные зависимости для расчёта теплотворной способности коры по абсолютной влажности / О. В. Чибирев, Ю. Н. Власов, Д. В. Бастриков // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. — 2016. — Т. 4, № 1 (21). — С. 108—111.
11. *Модин, Н. А.* Брикетирование измельчённой древесины и древесной коры / Н. А. Модин, А. Н. Ерошкин. — Москва : Лесная пром-сть, 1971. — 112 с.
12. Состояние инновационных разработок в области модификации древесины / В. А. Шамаев, О. А. Куницкая, И. В. Григорьев, А. И. Анучин, А. М. Волганкин, И. З. Челебадзе // Ремонт. Восстановление. Модернизация. — 2019. — № 1. — С. 41—48.
13. *Чибирев, О. В.* Экспериментальные исследования прессования опилок древесины сосны на гидравлическом прессе / О. В. Чибирев, О. А. Куницкая, Д. А. Ильюшенко // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. — 2016. — № 217. — С. 120—130.
14. *Базаров, С. М.* К уплотнению материала древесины путём его прессования / С. М. Базаров, С. В. Белокобыльский, О. А. Куницкая // Системы. Методы. Технологии. — 2011. — № 2 (10). — С. 107—108.

15. Математическая модель процессов прессования и обезвоживания пропитанных древесных материалов / О. А. Куницкая, В. Я. Шапиро, С. С. Бурмистрова, И. В. Григорьев // Научное обозрение. — 2011. — № 5. — С. 102—113.
16. Определение оптимальных параметров процесса прессования и обезвоживания пропитанных древесных материалов / О. А. Куницкая, В. Я. Шапиро, С. С. Бурмистрова, И. В. Григорьев // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. — 2012. — № 4. — С. 110—115.
17. Теоретическое исследование процесса разрушения массива грунта сферическими ножами при использовании комбинированных конструкций грунтометов для тушения лесных пожаров / В. Я. Шапиро, О. И. Григорьева, И. В. Григорьев, М. Ф. Григорьев // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. — 2018. — № 1 (361). — С. 61—69.
18. Математическое моделирование процесса уплотнения мёрзлого почвогрунта под воздействием лесных машин и трелёвочных систем / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, О. И. Григорьева // Системы. Методы. Технологии. — 2018. — № 3 (39). — С. 73—78.
19. Куницкая, О. А. Уплотнение древесных материалов под действием ударной нагрузки / О. А. Куницкая, Е. Г. Хитров, Д. А. Ильюшенко // Научное обозрение. — 2012. — № 4. — С. 121—127.
20. Коршак, А. В. Обоснование технологии производства древесных брикетов на прессовом оборудовании ударного типа : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Коршак Андрей Валентинович. — Санкт-Петербург : СПбГЛТА, 2011. — 20 с.
21. Кристенсен, Р. Введение в механику композитов / Р. Кристенсен. — Москва : Мир, 1982. — 334 с.

References

1. Pham Khan Toan, Nguyen Duc Cuong, Nguyen Thi Quy and Phi Kim Sinh Application of briquetting technology to produce briquettes from agricultural residues and by products. World Renewable Energy Congress VI. — 2000. — P. 1416—1419.
2. Particle density determination of pellets and briquettes / F. Rabier, M. Temmerman, T. Bohm, H. Hartmann, P. Daugbjerg, J. Rathbauer [et al.] // Biomass and Bioenergy. — 2006. — No 30. — P. 954—963.
3. Effect of biomaterial characteristics on pelletizing properties and biofuel pellet quality / R. Samuelsson, M. Thyrel, M. Sjöström, T. Lestander // Fuel Processing Technology. — 2009. — No 90. — P. 1129—1134.
4. Gomonai, M. V. Production of fuel briquettes. Wood raw materials, equipment, technologies, modes of work / M. V. Gomonai. — Moscow : Publishing house of the MSFU, 2006. — 68 p.
5. Industrial processes for biomass drying and their effects on the quality properties of wood pellets / M. Stahl, K. Granstrom, J. Berghel, R. Renstrom // Biomass and Bioenergy. — 2004. — No 27. — P. 621—628.
6. Comparison of quality and production cost of briquettes made from agricultural and forest origin biomass / M. Stolarski, S. Szczukowski, J. Tworkowski, M. Krzyzaniak, P. Gulczynski, M. Mleczek // Renewable Energy. — 2013. — No 57. — P. 20—26.
7. Takeshita, T. A strategy for introducing modern bioenergy into developing Asia to avoid dangerous climate change / T. Takeshita // Applied Energy. — 2009. — No 86. — P. 222—232.
8. GOST R 55115-2012 (EN 14961-3:2011) solid Biofuels. Technical characteristics and fuel classes. Part 3. Wood briquettes for non-industrial use.

9. *Akimova, T. A.* Ecology. Nature-man-Technique: Textbook for students. Universities / T. A. Akimova, A. P. Kuzmin, V. V. Haskin. — Moscow : Economics, 2007. — 510 p.
10. *Chibirev, O. V.* Approximated dependences for the calculation of the calorific value of the crust by absolute humidity / O. V. Chibirev, Yu. N. Vlasov, D. V. Bastrikov // Actual directions of scientific researches of the XXI century: theory and practice. — 2016. — Vol. 4, No 1 (21). — P. 108—111.
11. *Modin, N. A.* Briquetting of crushed wood and bark / N. A. Modin, A. N. Eroshkin. — Moscow : Forest industry, 1971. — 112 p.
12. As innovative developments in the field of modification of wood / V. A. Shamaev, O. A. Kunitskaya, I. V. Grigorev, A. I. Anuchin, A. M. Volvenkin, I. Z. Chelebadze // Repair. Recovery. Modernization. — 2019. — No 1. — P. 41—48.
13. *Chibirev, O. V.* Experimental studies of pressing sawdust pine wood on the hydraulic press / O. V. Chibirev, O. A. Kunitskaya, D. A. Ilyushenko // Proceedings of the St. Petersburg forestry Academy. — 2016. — No 217. — P. 120—130.
14. *Bazarov, S. M.* To seal the wood material by pressing / S. M. Bazarov, S. V. Belokobylsky, O. A. Kunitskaya // System. Methods. Technologies. — 2011. — No 2 (10). — P. 107—108.
15. Mathematical model of processes of pressing and dehydration of impregnated wood materials / O. A. Kunitskaya, V. Ya. Shapiro, S. S. Burmistrova, I. V. Grigoriev // Scientific review. — 2011. — No 5. — P. 102—113.
16. Determination of optimal parameters of the process of pressing and dehydration of impregnated wood materials / O. A. Kunitskaya, V. Ya. Shapiro, S. S. Burmistrova, I. V. Grigorev // Bulletin of the Moscow state forest University — Forest Bulletin. — 2012. — No 4. — P. 110—115.
17. Theoretical study of the process of destruction of soil with spherical knives using combined structures of soil meters to extinguish forest fires / V. Ya. Shapiro, O. I. Grigoreva, I. V. Grigorev, M. F. Grigorev // Proceedings of higher educational institutions. Forest journal. — 2018. — No 1 (361). — P. 61—69.
18. Mathematical modeling of compaction process of the frozen soil under the influence of forest machines and logging systems / S. E. Rudow, B. Ya. Shapiro, I. V. Grigorev, O. A. Kunitskaya, O. I. Grigorieva // System. Methods. Technologies. — 2018. — No 3 (39). — P. 73—78.
19. *Kunitskaya, O. A.* Compaction of wood materials under the impact load / O. A. Kunitskaya, E. G. Khitrov, D. A. Ilyushenko // Scientific review. — 2012. — No 4. — P. 121—127.
20. *Korshak, A. V.* Justification of technology of production of wood briquettes on the press equipment of shock type. The author's abstract : dis. ... kand. techn. sciences' / Korshak Andrei Valentinovich. — Saint-Petersburg : SpbgIta, 2011. — 20 p.
21. *Christensen, R.* Introduction to the mechanics of composites / R. Christensen. — Moscow : Mir, 1982. — 334 p.