



## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ВЫДЕРЖЕК БРИКЕТИРОВАНИЯ ЛЕСОСЕЧНЫХ ОТХОДОВ В УСЛОВИЯХ ЛЕСНЫХ ТЕРМИНАЛОВ

Ольга А. Куницкая<sup>1</sup> ✉, e-mail: ola.ola07@mail.ru, 0000-0001-8542-9380  
Александр В. Помигуев<sup>2</sup>, e-mail: Pomiguev.IAS@yandex, 0000-0002-6368-3967  
Дарья Д. Бурмистрова<sup>3</sup>, e-mail: olga.burm@mail.ru, 0000-0001-7515-4811  
Евгений А. Тихонов<sup>4</sup>, e-mail: tihonov@psu.karelia.ru, 0000-0003-2136-3268  
Тамара Н. Стородубцева<sup>5</sup>, e-mail: tamara-tns@yandex.ru, 0000-0002-4925-8542

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», шоссе Сергеляхское, 3 км, д. 3, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, 677007, Российская Федерация

<sup>2</sup>ФГКВБОУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушной авиации имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», ул. Маршала Жукова, д. 1, Самарская область, г. Сызрань-7, 446007, Российская Федерация

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет, ул. Первомайская, д. 13, Республика Коми, г. Ухта, 169300, Российская Федерация

<sup>4</sup>ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», просп. Ленина, д. 33, Республика Карелия, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация

<sup>5</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

В Российской Федерации при объеме лесозаготовок около 500 млн м<sup>3</sup> древесины на лесных терминалах образуется порядка 100 млн м<sup>3</sup> лесосечных отходов. Отходы, образующиеся на терминале, могут использоваться для выработки генераторного газа, но для этого необходима предварительная подготовка сырья. Для эффективного использования газогенераторных установок рекомендуется однородная структура сырья, которую можно достичь, например, за счет брикетирования отходов после их измельчения. При этом процесс брикетирования отходов на лесных терминалах будет отличаться от брикетирования в условиях специализированных предприятий. Лесные терминалы, являясь временными лесопромышленными складами, обычно не имеют централизованного подключения к электроэнергии. Использование в качестве энергетических установок двигателей внутреннего сгорания существенно удорожает процесс деревообработки, поскольку стоимость горючего достаточно существенна, а коэффициент полезного действия у двигателей внутреннего сгорания намного меньше, чем у электродвигателей. В этой связи поиск наиболее оптимальных мобильных энергетических установок для энергообеспечения лесных терминалов является достаточно актуальной задачей. На терминалах предпочтительно использовать более легкие прессы, поскольку требования к плотности и прочности брикетов для газогенераторных установок ниже, чем аналогичные показатели для биотоплива, предназначенного для продажи. Известные исследования ориентированы, в основном, на производство топливных брикетов, реализуемых стороннему потребителю, с плотностью свыше 1000 кг/м<sup>3</sup>. Для подачи брикетов в газогенераторные установки достаточна прочность, обеспечиваемая при плотности брикетов до 800 кг/м<sup>3</sup>. В указанном диапазоне плотности деформативные характеристики прессуемого материала будут различны, что обуславливает необходимость дальнейших экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** лесные терминалы, энергоснабжение, отходы лесозаготовок, брикетирование измельченной древесины


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


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


**Для цитирования:** Результаты экспериментальных выдержек брикетирования лесосечных отходов в условиях лесных терминалов / О. А. Куницкая, А. В. Помигуев, Д. Д. Бурмистрова, Е. А. Тихонов, Т. Н. Стородубцева // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 3 (43). – С. 109–120. – Библиогр.: с. 116–119 (22 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.3/9>.


**Поступила:** 09.06.2021 **Принята к публикации:** 15.09.2021 **Опубликована онлайн:** 01.10.2021


## RESULTS OF EXPERIMENTAL BRIQUETTING OF LOGGING WASTE IN THE CONDITIONS OF FOREST TERMINALS

**Olga A. Kunitskaya**<sup>1</sup> ✉, e-mail: [ola.ola07@mail.ru](mailto:ola.ola07@mail.ru),  0000-0001-8542-9380

**Alexander V. Pomiguyev**<sup>2</sup>, e-mail: [Pomiguyev.IAS@yandex](mailto:Pomiguyev.IAS@yandex),  0000-0002-6368-3967

**Darya D. Burmistrova**<sup>3</sup>, [olga.burm@mail.ru](mailto:olga.burm@mail.ru),  0000-0001-7515-4811

**Evgeny A. Tikhonov**<sup>4</sup>, e-mail: [tikhonov@psu.karelia.ru](mailto:tikhonov@psu.karelia.ru),  0000-0003-2136-3268

**Tamara N. Storodubtseva**<sup>5</sup>, [tamara-tns@yandex.ru](mailto:tamara-tns@yandex.ru),  0000-0002-4925-8542

<sup>1</sup>*Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Arctic state agrotechnological University», 677007, Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Sergelyakhskoe highway, 3 km, d 3, Russian Federation*

<sup>2</sup>*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», 446007, Samara region, Syzran - 7, Marshal Zhukov str., 1, Russian Federation*

<sup>3</sup>*Federal state budgetary educational institution of higher education "Ukhta state technical University", 13 Pervomayskaya str., Ukhta, Komi Republic, 169300, Russian Federation*

<sup>4</sup>*Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Petrozavodsk State University», Petrozavodsk, Russian Federation, 185910, Republic of Karelia, Petrozavodsk, prosp. Lenin, d. 33, Russian Federation*

<sup>5</sup>*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh city, 394087, Russian Federation*

### Abstract

About 100 million m<sup>3</sup> of timber waste is generated at forest terminals in the Russian Federation, with a harvesting volume of about 500 million m<sup>3</sup> of timber. Waste generated at the terminal can be used to produce generator gas, but this requires preliminary preparation of the raw materials. A homogeneous structure of raw materials is recommended for the efficient use of gas generating plants. It can be achieved, for example, by briquetting the waste after it has been crushed. At the same time, the process of briquetting waste at forest terminals will differ from briquetting in the conditions of specialized enterprises. Timber terminals, which are temporary warehouses for timber, usually do not have a centralized electricity connection. The use of internal combustion engines as power plants significantly increases the cost of the woodworking process, since the cost of fuel is quite high, and the efficiency of internal combustion engines is much lower than that of electric motors. In this regard, the search for the most optimal mobile power plants for power supply of forest terminals is a very urgent task. It is preferable to use lighter presses at terminals, since the requirements for density and strength of briquettes for gas-fired plants are lower than for biofuels intended for sale. Known studies are focused mainly on the production of fuel briquettes sold to third-party consumers with a density of

more than 1000 kg/m<sup>3</sup>. The strength is sufficient at a density of briquettes up to 800 kg/m<sup>3</sup> for feeding briquettes into gas generating plants. The deformation characteristics of the compacted material will be different in the indicated density range. It requires further experimental studies.

**Keywords:** forest terminals, power supply, logging waste, briquetting of chopped wood

**Acknowledgments:** The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

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

**For citation:** Kunitskaya O. A., Pomiguyev A. V., Burmistrova D. D., Tihonov E. A., Storodubtseva T. N. (2021) Results of experimental briquetting of logging waste in the conditions of forest terminals. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 11, No. 3 (43), pp. 109-120 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.3/9>.

**Received:** 09.06.2021 **Accepted for publication:** 15.09.2021 **Published online:** 01.10.2021

### Введение

Комплексная и эффективная переработка всей заготавливаемой фитомассы древесины, включая кроновую часть и, в ряде случаев, пневокорневую древесину, а также низкокачественную и низкотоварную древесину, повышает эффективность лесного комплекса в целом [1, 2].

Выращивание лесных плантаций энергетического назначения (топливных плантаций) широко распространено в мире, и в ближайшее время ожидается распространение этой практики и в Российской Федерации [3-6].

Одним из наиболее распространенных видов топлива из древесины являются топливные брикеты, которые могут иметь достаточно широкий спектр применения, включая лесные терминалы (непостоянные лесопромышленные склады) [7-10].

Теории и практике брикетирования измельченного древесного сырья посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных исследователей. Подробный анализ актуального состояния вопроса в области теории брикетирования отходов лесопереработки выполнен в [12], результаты теоретических исследований в области использования гидравлических прессов для брикетирования обсуждаются в [13]. В работе [14] представлена математическая модель прессования брикета из измельченных древесных материалов с учетом изменения физико-механических свойств сырья в процессе уплотнения; приведены зависимо-

сти, позволяющие обосновать давление прессования, требующееся для формирования брикета с плотностью свыше 1 г/см<sup>3</sup>. В исследованиях [15, 16] представлены математические модели, позволяющие учесть влияние реологических свойств брикетируемого сырья и скорости прессования на силовые показатели процесса. В работе [17] приводятся разработки по моделированию влияния формы брикета на давление и скорость прессования с учетом реологических свойств сырья; рассчитываются показатели процесса получения брикетов округлой формы.

В исследованиях зарубежных ученых приводятся результаты экспериментов в области производства брикетов и пеллет [18, 19]. Представляют интерес экспериментальные исследования в области изучения влияния параметров обработки сырья на показатели качества топливных брикетов [20-22].

Но подавляющее большинство известных публикаций по данному вопросу посвящено подготовке древесной массы к брикетированию и различным аспектам прессования при производстве топливных брикетов на стационарном оборудовании и получении высокоплотных брикетов.

### Материалы и методы

Настоящее исследование выполнено в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» и ориентировано на брикетиро-

вание лесосечных отходов в условиях лесного терминала, в связи с чем непосредственно прессование брикета изучали как составную часть процесса, реализуемого установкой, схема которой представлена на рис. 1.

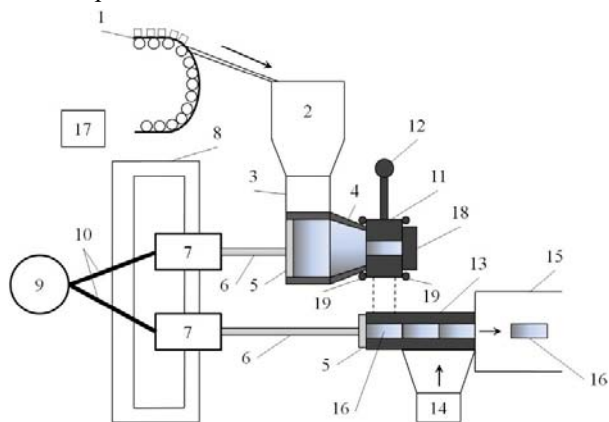


Рисунок 1. Установка брикетирования измельченных отходов: 1 - ленточный транспортер; 2 - бункер; 3 - дозатор; 4 - конус; 5 - пуансон; 6 - шток гидроцилиндра; 7 - гидроцилиндр; 8 - рама прессы; 9 - гидростанция; 10 - маслопровод; 11 - матрица; 12 - электроцилиндр; 13 - камера охлаждения; 14 - вентилятор; 15 - транспортер к газогенератору; 17 - топливный брикет; 18 - пульт управления; 19 - упор; 20 - пружины; 21 - топливный брикет

Figure 2. Installation for briquetting crushed waste: 1 - belt conveyor; 2 - hopper; 3 - dispenser; 4 - cone; 5 - punch; 6 - hydraulic cylinder rod; 7 - hydraulic cylinder; 8 - press frame; 9 - hydro station; 10 - oil line; 11 - matrix; 12 - electric cylinder; 13 - cooling chamber; 14 - fan; 15 - conveyor to the gas generator; 17 - fuel briquette; 18 - control panel; 19 - stop; 20 - pru - gins; 21 - fuel briquette

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Установка работает следующим образом. Горячая щепа транспортером 1 поступает в бункер 2 и далее в дозатор 3. Дозированное количество щепы (700 г) поступает в пресс-конус 4, где включается первый гидроцилиндр 7 и телескопический пуансон 5 прессует щепу в матрицу 11, где происходит формообразование брикета с диаметром 90 мм и высотой 100 мм. В таком положении происходит выдержка в течение 20 с. После этого давление в гидроцилиндре плавно снижается до атмосферного. Пружины 20 отделяют матрицу 11 от пресс-конуса 4 и упора 13, включается электроцилиндр (механотронный модуль) 12, который перемещает матрицу 11 с брикетом 21 к камере охлаж-

дения 13 длиной 300 мм. Включением второго гидроцилиндра 7 брикет 21 заталкивается в камеру охлаждения 13, которая за счет вентилятора 14 обдувается холодным воздухом, забираемым с улицы. За счет этого цилиндрическая поверхность брикета охлаждается и, начиная с четвертого хода поршня, брикет 17 свободно выпадает из камеры охлаждения и падает на ленточный транспортер 15, идущий к газогенератору. Через 2-3 мин брикет попадает в топку газогенератора и обеспечивает равномерное выделение тепла при горении. Установка брикетирования позволяет использовать практически весь диапазон древесных частиц, получаемых на рубильных машинах различного класса, а также повысить равномерность и скорость выделения газов в газогенераторе.

Непосредственно прессование брикетов производилось на механотронном модуле, элементы которого представлены на рис. 2-4. На рис. 2 представлен механотронный модуль без прессующего конуса и матрицы, на рис. 3 – конус и матрица в сборе, на рис. 4 – конус с дозой щепы и матрица с запрессованным брикетом.

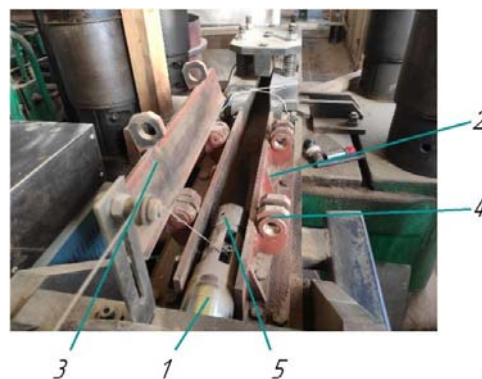


Рисунок 2. Механотронный модуль прессования брикетов: 1 – электроцилиндр; 2 – пресс-форма; 3 – крышка прессформы, 4 – механизм фиксации крышки с пресс-формой; 5 – пуансон

Figure 2. Mechanotron module for pressing briquettes: 1 – electric cylinder; 2 – mold; 3 – preform cover, 4 – mechanism for fixing the lid with the mold; 5 – punch

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Технические характеристики установки приведены в табл. 1.

Получение брикетов происходило следующим образом. Щепа различной влажности, разме-

ров и температуры помещалась в конус, установленный на матрице.

Количество щепы колебалось от 500 г до 800 г, что соответствовало плотности брикета 500-800 кг/м<sup>3</sup>.

Т а б л и ц а 1

Технические характеристики установки  
брикетирования

T a b l e 1

Technical characteristics of the briquetting plant

№	Наименования показателя   Indicator names	Размерность   Dimension	Значения   Values
1	Размеры (длина) древесных частиц,   Dimensions (length) of wood particles min max	мм   mm мм   mm	3 30
2	Влажность частиц   Particle humidity	%	15-25
3	Порода древесины   Wood type	сосна, осина, ель, береза   pine, aspen, spruce, birch	
4	Содержание зелени, не более   Green content, no more than	%	20
5	Размеры брикета:   Briquette dimensions диаметр   diameter Высота   Height	мм   mm	90 100
6	Масса брикета   Briquette weight	кг   kg	0.7
7	Плотность брикета   Briquette density	кг/м <sup>3</sup>   kg/m <sup>3</sup>	750-800
8	Усиление гидроцилиндра   Hydraulic cylinder reinforcement	т   t	50
9	Габариты установки   Installation dimensions Длина   Length Ширина   Width Высота   Height	м   m м   m м   m	4 1.6 1.4
10	Масса установки   Installation weight	т   t	2.9
11	Производительность установки   Installation performance	кг/ч   kg/h	56

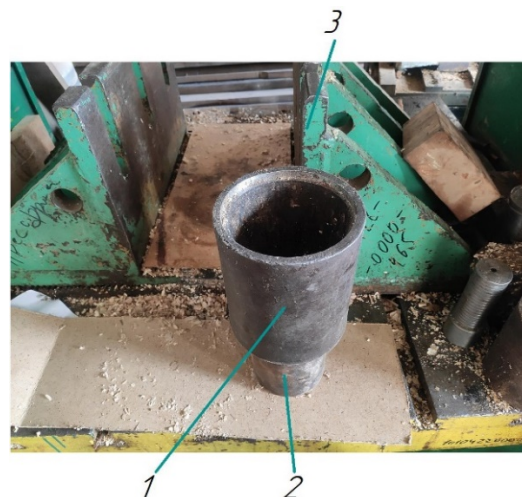


Рисунок 3. Узлы прессования механотронного модуля:  
1 – прессующий конус; 2 – матрица; 3 – прессформа  
Figure 3. Pressing units of the vacuum tube module:  
1 – pressing cone; 2 – die; 3 – mold

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition



Рисунок 4. Прессующий конус и матрица с древесиной: 1 – конус; 2 – щепа; 3 – матрица; 4 – прессованный брикет

Figure 4. Pressing cone and die with wood: 1 – cone; 2 – wood chips; 3 – matrix; 4 – pressed briquette

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

При этом усилие электроцилиндра развивалось в интервале 12-25 т, что соответствовало удельному давлению 20-45 МПа. Конец штока электроцилиндра снабжен телескопическим пуансоном, который менял свой диаметр от 140 до 90 мм. Конус с приемником укладывались в прессформу, крышка закрывалась, и шток электроцилиндра проталкивал щепу в приемнике, формируя брикет высотой 100 мм и диаметром 90 мм. Обратным движением штока брикет в матрице извлекался из пресс-формы и проходил кондиционирование, а в



пресс-форму устанавливался конус с новым приемником, и операция повторялась.

Используемая в экспериментах щепка состояла на 80 % из древесины сосны и на 20 % из древесины березы. Состав сырья принимали постоянным: это щепка без фракционирования размерами длина 3-30 мм, ширина 1-15 мм, толщина 1-10 мм. Допускалось включение 1-3 % опилок. Влажность щепы задавалась параметрами сушильной камеры, для экспериментов принят диапазон от 5 до 30 %.

При проведении исследований ориентировались на плотность брикета в диапазоне 500-1000 кг/м<sup>3</sup>, для чего массу прессуемой щепы принимали 500 г, 600 г, 700 г, 800 г.

Температура щепы, выходящей из сушилки, составляет 80-90 °С, в процессе прессования температура составляла 80±5 °С.

Время выдержки в пресс-форме определяется конструкцией установки и в экспериментах исследовалось в диапазоне от 20 с до 12 мин. В качестве индикатора процесса определялась распрессовка брикета после выталкивания его из матрицы. Поскольку увеличение диаметра брикета незначительное (0,5-1 мм), то контролировалось изменение его высоты.

Плотность и влажность брикетов определялась по ГОСТ 16483.1-84 и ГОСТ 16483.7-71 сразу после выпрессовки из матрицы.

Число наблюдений в опытах подбирали таким образом, чтобы обеспечить оценки критериев воспроизводимости опытов и адекватности математических моделей при мощности 0,05, что является общепринятым для исследований в области брикетирования растительного сырья.

### Результаты и обсуждение

Давление прессования связано с конечной плотностью брикета и, в меньшей степени, с влажностью и температурой сырья. Средние результаты экспериментальных замеров (по 3 наблюдениям) представлены на рис. 5.

В результате пересчета экспериментальных данных получим оценку взаимосвязи напряжения сжатия и относительной деформации материала брикета (рис. 6).

Экспериментальные данные практически точно описываются степенными функциями

$$\sigma = a\varepsilon^b, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – сжимающее напряжение,  $\varepsilon$  – относительная деформация сжатия, числовые значения коэффициентов  $a, b$  представлены в табл. 2.

Высота брикета, т.е. размер в направлении прессования, является определяющей величиной, влияющей на его стабильность.

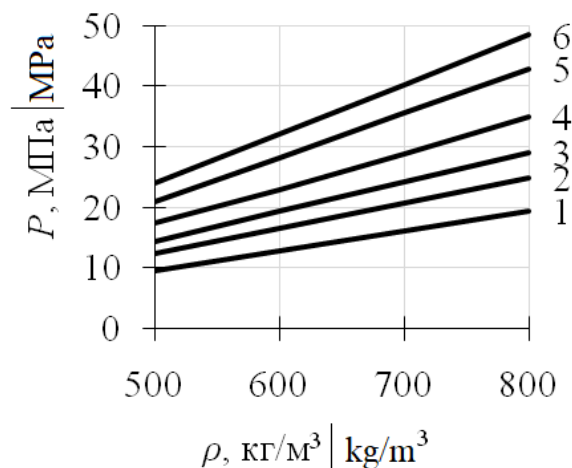


Рисунок 5. Взаимосвязь давления прессования и плотности брикета в матрице: 1 - влажность 10 %, температура 20 °С; 2 - влажность 10 %, температура 100 °С; 3 - влажность 15 %, температура 20 °С; 4 - влажность 15 %, температура 100 °С; 5 - влажность 20 %, температура 20 °С; 6 - влажность 20 %, температура 100 °С

Figure 5. The relationship between the pressing pressure and the density of the briquette in the matrix: 1 - humidity 10 %, temperature 20 °С; 2 - humidity 10 %, temperature 100 °С; 3 - humidity 15 %, temperature 20 °С; 4 - humidity 15 %, temperature 100 °С; 5 - humidity 20 %, temperature 20 °С; 6 - humidity 20 %, temperature 100 °С

Источник: собственные измерения авторов  
Source: authors' own measurements

После выпрессовки брикета в нем срабатывают упругие силы и его высота со 100 мм увеличивается до 115-120 мм для плотности 500, 600 и 700 кг/м<sup>3</sup>.

Обработка опытных данных показала, что с точностью, достаточной для практических расчетов, функция распрессовки брикетов по времени может быть представлена экспоненциальной зависимостью

$$\varepsilon = \alpha \exp \beta t, \quad (2)$$

параметры которой представлены в табл. 2.

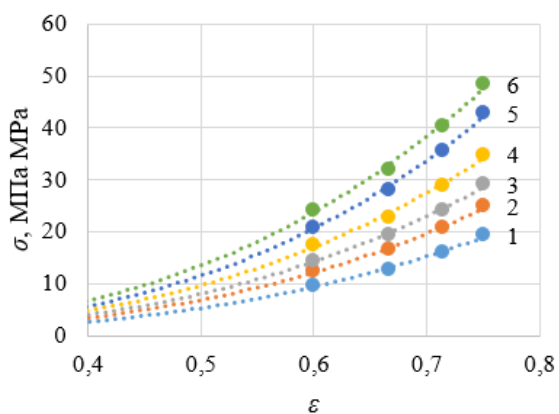


Рисунок 6. Взаимосвязь напряжения сжатия и относительной деформации материала брикета в матрице: 1 – влажность 10 %, температура 20 °С; 2 – влажность 10 %, температура 80 °С; 3 – влажность 15 %, температура 20 °С; 4 – влажность 15 %, температура 80 °С; 5 – влажность 20 %, температура 20 °С; 6 – влажность 20 %, температура 80 °С

Figure 6. The relationship between the compression stress and the relative deformation of the briquette material in the matrix: 1 - humidity 10%, temperature 20 °C; 2 - humidity 10%, temperature 80 °C; 3 - humidity 15%, temperature 20 °C; 4 - humidity 15%, temperature 80 °C; 5 - humidity 20%, temperature 20 °C; 6 - humidity 20%, temperature 80 °C

Источник: собственные измерения авторов  
Source: authors' own measurements

Т а б л и ц а 2

Результаты аппроксимации экспериментальных данных

Table 2

Results of experimental data approximation

$W, \%$	$T$	$a$	$b$	$\alpha$	$\beta$
10	20	116.03	3.1078	0.6975	-0.003
10	80	105.13	3.1863	0.6961	-0.005
15	20	83.192	3.1064	0.6916	-0.01
15	80	69.98	3.1178	0.6832	-0.012
20	20	60.009	3.1239	-	-
20	80	46.716	3.1362	-	-

в таблице обозначено:  $W$  – абсолютная влажность,  $T$  – температура брикетируемого сырья,  $a, b$  – значения коэффициентов в формуле (1),  $\alpha, \beta$  – значения коэффициентов в формуле (2)

Восстановление размеров по высоте брикетов проиллюстрировано рис. 7, 8.



Рисунок 7. Изменение высоты брикетов при хранении: 1 – 5 мин; 2 – 0,5 ч; 3 – 2 ч; 4 – 24 ч (брикеты получены при влажности 10 %, температуре 80 °С, времени выдержки в матрице 12 мин)

Figure 7. Change in the height of the briquettes during storage: 1 - 5 min; 2 - 0.5 h; 3 - 2 h; 4 - 24 h (briquettes were obtained at a humidity of 10%, a temperature of 80 °C, a holding time in the matrix of 12 min)

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

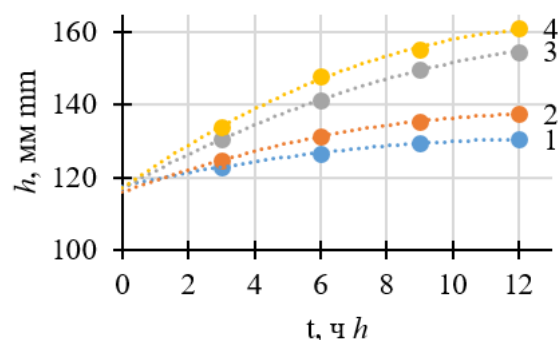


Рисунок 8. Увеличение высоты брикетов в зависимости от времени хранения: 1 - влажность 15 %, температура 20 °С; 2 - влажность 15 %, температура 80 °С; 3 - влажность 10 %, температура 20 °С; 4 - влажность 10 %, температура 80 °С

Figure 8. Increasing the height of the briquettes depending on the storage time: 1 - humidity 15%, temperature 20 °C; 2 - humidity 15%, temperature 80 °C; 3 - humidity 10%, temperature 20 °C; 4 - humidity 10%, temperature 80 °C

Источник: собственные измерения авторов  
Source: authors' own measurements

Таким образом, распрессовка брикетов, связанная с изменением деформации относительно брикета, еще не извлеченного из матрицы, пред-

ставляется зависимостями, проиллюстрированными на рис. 9.

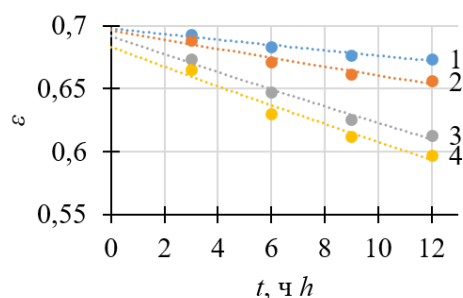


Рисунок 9. Распрессовка брикетов в зависимости от времени хранения: 1 - влажность 10 %, температура 20 °С; 2 - влажность 10 %, температура 80 °С; 3 - влажность 15 %, температура 20 °С; 4 - влажность 15 %, температура 80 °С

Figure 9. Pressing of briquettes depending on the storage time: 1 - humidity 10%, temperature 20 °С; 2 - humidity 10%, temperature 80 °С; 3 - humidity 15%, temperature 20 °С; 4 - humidity 15%, temperature 80 °С

Источник: собственные измерения авторов  
Source: authors' own measurements

### Выводы

Обработка опытных данных показала, что с точностью, достаточной для практических расчетов, функция распрессовки брикетов по времени

может быть представлена экспоненциальной зависимостью

$$\varepsilon = \alpha \exp \beta t, \quad (2)$$

параметры которой представлены в табл. 2.

Дальнейшая обработка опытных данных позволила описать взаимосвязь напряжения сжатия при прессовании и деформации в виде многопараметрической функции

$$\sigma = (0,848 - 12,2W + 13,6T + 0,215W^2 - 0,138T^2) \cdot \varepsilon^{3,13} \quad (3)$$

Кроме того, в результате обработки экспериментальных данных могут быть получены сведения о соотношении параметров реологической модели прессуемого сырья. При использовании реологической модели с параллельным соединением упругого и вязкого элемента на стадии восстановления формы относительная деформация пропорциональна величине  $\exp\left(-\frac{E_0}{\eta}t\right)$  ( $E_0$  – модуль деформации,  $\eta$  – вязкость), структура данной формулы аналогична функции (2).

Результаты экспериментов и их обработки будут использованы при реализации теоретической модели прессования измельченного древесного сырья на лесных терминалах.

### Список литературы

1. Grigorev I., Shadrin A., Katkov S. (et al.) Russian sawmill modernization (a case study). Part 2: improving the efficiency of wood chipping operations. International Wood Products Journal. 2021. DOI: 10.1080/20426445.2020.1871276.
2. Grigorev I., Ivanov V., Khitrov E., Kalistratov A., Bozhbov V. New approach for forest production stocktaking based on energy cost . 14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2014. Sofia, 2014. pp. 407-414.
3. 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. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.4/19.
4. 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. Деревообрабатывающая промышленность. 2021; 1: 16-26.
5. 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 кн. 2018. С. 75-78.
6. 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): 125-134. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.125.



7. Grigorev I.V., Shadrin A.A., Voronova A.M. (et al.) Improving the efficiency of wood chipping operations. INMATEH - Agricultural Engineering. 2020; 61(2): 217-224. DOI: 10.35633/inmateh-61-24.
8. Григорьев В. И. Возможности развития импорта российского твердого биотоплива. Повышение эффективности лесного комплекса. Материалы Шестой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием. Петрозаводск, 2020. С. 44-45.
9. Григорьев В. И., Ермакова Н. А. Трансформация цепочек добавленной стоимости в российской лесной промышленности. Инновационная экономика. 2020;4 (25): 4-19.
10. Григорьев В. И., Беляева Н. Б. Политико-экономические аспекты развития производства древесного биотоплива в России. Инновационные процессы в науке и технике XXI века. Материалы XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, ученых, педагогических работников и специалистов-практиков. Тюмень, 2020. С. 116-119.
11. 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): 40-46. DOI: 10.18324/2077-5415-2020-2-40-46.
12. Власов Ю. Н., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Хитров Е. Г. Анализ исследований по тематике прессования древесных отходов. Resources and Technology. 2020;17(2): 1-22. DOI: 10.15393/j2.art.2020.5183.
13. Чибирев О. В., Куницкая О. А., Давтян А. Б. Анализ исследований процесса брикетирования отходов лесопереработки на гидравлическом прессовом оборудовании. Resources and Technology. 2019;16(2): 97-118. DOI: 10.15393/j2.art.2019.4522.
14. Чибирев О. В., Куницкая О. А., Григорьев М. Ф. Расчет потребного давления прессования опилок при формировании брикета. Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019;2: 22-25. DOI: 10.31044/1684-2561-2019-0-2-22-25.
15. Vlasov Yu., Khitrov E., Khakhina A., Grigorev G., Dmitrieva I. Theoretical effect of moulding speed and processing time on sawdust briquettes density. 19<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019. Conference proceedings. 2019: 861-868. DOI: 10.5593/sgem2019/3.2/S14.111.
16. Хитров Е. Г., Власов Ю. Н., Угрюмов С. А. Топливные брикеты из древесных опилок и математическое описание процесса их брикетирования. Все материалы. Энциклопедический справочник. 2019. № 10. С. 34-40. DOI: 10.31044/1994-6260-2019-0-10-34-40.
17. Бирман А. Р., Хитров Е. Г., Угрюмов С. А., Власов Ю. Н. Совершенствование производства круглых топливных брикетов из древесных опилок. Все материалы. Энциклопедический справочник. 2020. № 1. С. 41-46. DOI: 10.31044/1994-6260-2020-0-1-41-46.
18. Krizan P., Šoos L., Matus M., Svatek M., Vukelic D. Evaluation of measured data from research of parameters impact on final briquettes density. In: Aplimat – Journal of Applied Mathematics. Vol. 3, No. 3 (2010), pp. 68–76. (PDF) Evaluation of measured data from research of parameters impact on final briquettes density (researchgate.net).
19. Nilsson D., Bernesson S., Hansson P. Pellet production from agricultural raw materials - A systems study. Biomass and Bioenergy, 2011;35: 679-689. DOI:10.1016/j.biombioe.2010.10.016.
20. Nimlos M. N., Brooking E., Looker M. J., Evans R. J. Biomass torrefaction studies with a molecular beam mass spectrometer. Prepr. Pap.-Am. Chem. Soc. 2003; 48(2): 590. (PDF) Biomass Torrefaction Studies With a Molecular Beam Mass Spectrometer (researchgate.net).
21. Lehtikangas P. Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. Biomass and Bioenergy, 2001; 20: 351-360. DOI:10.1016/S0961-9534(00)00092-1.
22. Blecher L., Kwade A., Schwedes J. Motion and stress intensity of grinding beads in a stirred media mill. Part 1: Energy density distribution and motion of single grinding beads. Powder Technology, 1996;86: 59-68. Lutz Blecher's research works | Technische Universität Braunschweig, Braunschweig and other places (researchgate.net).

### References

1. Grigorev I., Shadrin A., Katkov S. (et al.) Russian sawmill modernization (a case study). Part 2: improving the efficiency of wood chipping operations. *International Wood Products Journal*. 2021. DOI: 10.1080/20426445.2020.1871276.
2. Grigorev I., Ivanov V., Khitrov E., Kalistratov A., Bozhbov V. New approach for forest production stocktaking based on energy cost . 14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2014. Sofia, 2014. pp. 407-414.
3. Tambi A. A., Morkovina S. S., Grigorev I. V., Grigorev V. I. Razvitie cirkulyarnoj ekonomiki v Rossii: rynek biotopliva [Development of the circular economy in Russia: biofuels market]. *Lesotekhnicheskij zhurnal [Forest Engineering Journal]*. 2019. Vol. 9. № 4 (36), pp. 173-185 (in Russian). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.4/19.
4. Markov O. B., Voronov R. V., Davtyan A. B., Grigorev I. V., Kalita G. A. Matematicheskaya model' vybora sistemy mashin dlya sozdaniya i ekspluatatsii lesnyh plantacij [Mathematical model of choosing a system of machines for the creation and operation of forest plantations]. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry]*. 2021. № 1. pp. 16-26 (in Russian).
5. Grigorev V. I. Lesnye plantacii v Aziatsko-Tihookeanskom regione [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 (in Russian).
6. Voronov R. V., Markov O. B., Grigor'ev I. V., Davtyan A. B., Voronov R. V. Matematicheskaya model' modul'nogo principa podbora sistemy mashin dlya sozdaniya i ekspluatatsii lesnyh plantacij [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 journal]*, 2019, № 5 (371), pp. 125-134. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.125 (in Russian).
7. Grigorev I. V., Shadrin A. A., Voronova A. M. Improving the efficiency of wood chipping operations. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2020; 61(2): 217-224. DOI: 10.35633/inmateh-61-24.
8. Grigorev V. I. Vozможности razvitiya importa rossijskogo tverdogo biotopliva [Opportunities for developing imports of Russian solid biofuels]. *Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa. Materialy Shestoj Vserossijskoj nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Petrozavodsk [Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the Sixth All-Russian National Scientific and Practical Conference with International Participation. Petrozavodsk]*, 2020. pp. 44-45 (in Russian).
9. Grigorev V. I., Ermakova N. A. Transformaciya cepochek dobavlennoj stoimosti v rossijskoj lesnoj promyshlennosti [Transformation of value chains in the Russian forest industry] *Innovacionnaya ekonomika [Innovative economy]*. 2020;4 (25): 4-19 (in Russian).
10. Grigorev V. I., Belyaeva N. B. Politiko-ekonomicheskie aspekty razvitiya proizvodstva drevesnogo biotopliva v Rossii [Political and economic aspects of the development of wood biofuel production in Russia]. *Innovacionnye processy v nauke i tekhnike XXI veka. Materialy XVIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov, uchenyh, pedagogicheskikh rabotnikov i specialistov-praktikov. Tyumen [Innovative processes in science and technology of the XXI century. Materials of the XVIII International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates, Scientists, Teachers and Practitioners. Tyumen]* 2020. p. 116-119 (in Russian).
11. Vlasov Yu. N., Grigorev I. V., Kunickaya O. A., Hitrov E. G., Runova E. M. Modelirovanie fiziko-mekhanicheskikh svojstv syr'ya dlya proizvodstva toplivnyh briketov [Modeling of physical and mechanical properties of raw materials for the production of fuel briquettes]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii [The system. Methods. Technologies]*. 2020;2 (46): 40-46. DOI: 10.18324/2077-5415-2020-2-40-46 (in Russian).

12. Vlasov Yu. N., Grigorev I. V., Kunickaya O. A., Hitrov E. G. Analiz issledovaniy po tematike pressovaniya drevesnyh othodov [Analysis of research on the topic of wood waste pressing]. Resources and Technology. 2020; 17(2): 1-22. DOI: 10.15393/j2.art.2020.5183 (in Russian).
13. Chibirev O. V., Kunickaya O. A., Davtyan A. B. Analiz issledovaniy processa briketirovaniya othodov lesopererabotki na gidravlicheskom pressovom oborudovanii [Analysis of studies of the process of briquetting wood processing waste on hydraulic press equipment]. Resources and Technology. 2019;16(2): 97-118. DOI: 10.15393/j2.art.2019.4522 (in Russian).
14. Chibirev O. V., Kunickaya O. A., Grigorev M. F. Raschet potrebnogo davleniya pressovaniya opilok pri formirovani briketa [Calculation of the required pressure for pressing sawdust when forming a briquette]. Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya [Repair. Recovery. Modernization]. 2019;2: 22-25. DOI: 10.31044/1684-2561-2019-0-2-22-25 (in Russian).
15. Vlasov Yu., Khitrov E., Khakhina A., Gigorev G., Dmitrieva I. Theoretical effect of moulding speed and processing time on sawdust briquettes density. 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019. Conference proceedings. 2019: 861-868. DOI: 10.5593/sgem2019/3.2/S14.111.
16. Hitrov E. G., Vlasov Yu. N., Ugryumov S. A. Toplivnye brikety iz drevesnyh opilok i matematicheskoe opisanie processa ih briketirovaniya [Fuel briquettes made of sawdust and a mathematical description of the process of their briquetting]. Vse materialy. Enciklopedicheskij spravochnik [All materials. Encyclopedic reference book] 2019. № 10, pp. 34-40. DOI: 10.31044/1994-6260-2019-0-10-34-40 (in Russian).
17. Birman A. R., Hitrov E. G., Ugryumov S. A., Vlasov Yu. N. Sovershenstvovanie proizvodstva kruglyh toplivnyh briketov iz drevesnyh opilok [Improving the production of round fuel briquettes from sawdust]. Vse materialy. Enciklopedicheskij spravochnik [All materials. Encyclopedic reference book]. 2020. № 1. pp. 41-46. DOI: 10.31044/1994-6260-2020-0-1-41-46. (in Russian)
18. Krizan P., Šoos L., Matus M., Svatek M., Vukelic D. Evaluation of measured data from research of parameters impact on final briquettes density. In: Aplimat – Journal of Applied Mathematics. Vol. 3, No. 3 (2010), pp. 68–76. (PDF) Evaluation of measured data from research of parameters impact on final briquettes density (researchgate.net).
19. Nilsson D., Bernesson S., Hansson P. Pellet production from agricultural raw materials - A systems study. Biomass and Bioenergy, 2011;35: 679-689. DOI:10.1016/j.biombioe.2010.10.016.
20. Nimlos M. N., Brooking E., Looker M. J., Evans R. J. Biomass torrefaction studies with a molecular beam mass spectrometer. Prepr. Pap.-Am. Chem. Soc. 2003; 48(2): 590. (PDF) Biomass Torrefaction Studies With a Molecular Beam Mass Spectrometer (researchgate.net).
21. Lehtikangas P. Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. Biomass and Bioenergy, 2001; 20: 351-360. DOI:10.1016/S0961-9534(00)00092-1.
22. Blecher L., Kwade A., Schwedes J. Motion and stress intensity of grinding beads in a stirred media mill. Part 1: Energy density distribution and motion of single grinding beads. Powder Technology, 1996;86: 59-68. Lutz Blecher's research works | Technische Universität Braunschweig, Braunschweig and other places (researchgate.net).

### Сведения об авторах

✉ *Куницкая Ольга А.* – профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», шоссе Сергеляхское, 3 км, д. 3, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, 677007, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, e-mail: [ola.ola07@mail.ru](mailto:ola.ola07@mail.ru).

*Помигуев Александр В.* – преподаватель 1 кафедры тактики и общевойсковых дисциплин филиала ФГКВУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», ул. Маршала Жукова, д. 1, Самарская область, г. Сызрань-7, 446007, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6368-3967>, e-mail: [Pomiguev.IAS@yandex](mailto:Pomiguev.IAS@yandex).

*Бурмистрова Дарья Д.* – аспирант I курса кафедры «Технологии и машин лесозаготовок и инженерной геодезии» ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», ул. Первомайская, д. 13, Республика Коми, г. Ухта, 169300, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7515-4811>, e-mail: [olga.burm@mail.ru](mailto:olga.burm@mail.ru).

*Тихонов Евгений А.* – доцент кафедры «Транспортных и технологических машин и оборудования», ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», просп. Ленина, д. 33, Республика Карелия, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2136-3268>, e-mail: [tihonov@psu.karelia.ru](mailto:tihonov@psu.karelia.ru).

*Стородубцева Тамара Н.* – заведующий кафедрой промышленного транспорта, строительства и геодезии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4925-8542>, e-mail: [tamara-tns@yandex.ru](mailto:tamara-tns@yandex.ru).

### Information about the authors

✉ *Olga A. Kunitskaya* – Professor of the Department "Technology and equipment of the forest complex" of the Arctic state agrotechnological university, 677007, Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Sergelyakhskoe highway, 3 km, d. 3, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, e-mail: [ola.ola07@mail.ru](mailto:ola.ola07@mail.ru).

*Alexander V. Pomiguyev* – Teacher of the 1st Department of Tactics and General Military Disciplines, branch of the Federal State Educational and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin", 446007, Samara region, Syzran-7, Marshal Zhukov str., 1, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6368-3967>, e-mail: [Pomiguyev.IAS@yandex.ru](mailto:Pomiguyev.IAS@yandex.ru).

*Darya D. Burmistrova* – First-year post-graduate student of the Department of "Technologies and Machines of Logging and Engineering Geodesy", Ukhta State Technical University, 13 Pervomayskaya str., Ukhta, Komi Republic, 169300, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7515-4811>, e-mail: [olga.burm@mail.ru](mailto:olga.burm@mail.ru).

*Evgeny A. Tikhonov* – Associate Professor of the Department of Transport and Technological Machines and Equipment, Petrozavodsk State University, 185910, Republic of Karelia, Petrozavodsk, prosp. Lenin, d. 33, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2136-3268>, e-mail: [tihonov@psu.karelia.ru](mailto:tihonov@psu.karelia.ru).

*Tamara N. Storodubtseva* – Doctor of technical sciences, head of the department of industrial transport, construction and geodesy, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov, Timiryazev str., 8 Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4925-8542>, e-mail: [tamara-tns@yandex.ru](mailto:tamara-tns@yandex.ru).