

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 662.741

DOI:10.18324/2077-5415-2021-1-59-66

### Обоснование технологии производства и экспериментальные исследования свойств топливных брикетов, предназначенных для использования в условиях лесных терминалов

А.В. Помигуев<sup>1а</sup>, О.А. Куницкая<sup>2б</sup>, И.В. Григорьев<sup>2с</sup>, Е.А. Тихонов<sup>3д</sup>, В.А. Иванов<sup>4е</sup>

<sup>1</sup> Филиал Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» в Сызрани, ул. Маршала Жукова, 1, Сызрань, Россия

<sup>2</sup> Арктический государственный агротехнологический университет, Сергеляхское шоссе, 3, Якутск, Республика Саха (Якутия)

<sup>3</sup> Петрозаводский государственный университет, пр. Ленина, 33, Петрозаводск, Республика Карелия

<sup>4</sup> Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

<sup>а</sup> pomiguev.ias@yandex.ru, <sup>б</sup> ola.ola07@mail.ru, <sup>с</sup> silver73@inbox.ru, <sup>д</sup> tihonov@petsu.ru, <sup>е</sup> ivanovva55@mail.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6368-3967>; <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>; <sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>;

<sup>д</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>; <sup>е</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0707-972X>

Статья поступила 28.01.2021, принята 04.02.2021

*В процессе заготовки деловой древесины на лесосеке остается 20–30 % биомассы, которую несложно переработать в щепу при помощи мобильных рубительных машин в последние 20 лет появились установки, позволяющие в условиях лесного терминала перерабатывать щепу в мелкоформатные топливные брикеты. Это направление развито в Швеции и Финляндии. Технология переработки лесосечных отходов предусматривает измельчение их в рубительных машинах, дробление полученной щепы на мелкие фракции, до длины не более 8 мм, сушка до влажности 10 %, и брикетирование щепы в топливные брикеты плотностью 800 кг/м<sup>3</sup>. На одном лесном терминале можно перерабатывать в год 50 тыс. м<sup>3</sup> лесосечных отходов. При этом необходимо учитывать, что через 1–2 года лесной терминал перебазируется на новое место лесозаготовки. Суть предлагаемой авторами концепции заключается в том, что отходы лесозаготовки, образующиеся в лесном терминале, поступают в газогенератор, где образуется генераторный (древесный) газ. Из получаемого при сгорании генераторного газа получают тепловую энергию, которую преобразуют в электроэнергию. Существующие стационарные установки сжигания щепы и опилок являются стационарными и неприменимы в условиях лесного терминала. Для того, чтобы их использовать в условиях лесного терминала, необходимо изменить структуру загружаемого в них сырья. Из рубительной машины поступает сырье длиной от 3 до 30 мм, поэтому сжигание их в установке будет происходить неравномерно. Это вызывает необходимость подачи сырья более однородного строения, т. е. предварительного брикетирования. В настоящей работе рассмотрена технология получения топливных брикетов из разнородного по размерам сырья, а также методика, аппаратура и результаты экспериментального изучения их физических свойств.*

**Ключевые слова:** топливные брикеты; лесные терминалы; физико-механические свойства; лесосечные отходы.

### Justification of the production technology and experimental studies of the properties of fuel briquettes intended for use in the conditions of forest terminals

A.V. Pomiguev<sup>1а</sup>, O.A. Kunitskaya<sup>2б</sup>, I.V. Grigorjev<sup>2с</sup>, E.A. Tikhonov<sup>3д</sup>, V.A. Ivanov<sup>4е</sup>

<sup>1</sup> Branch of the Military Training and Research Center of the Air Force «Air Force Academy named after N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin»; 1, Marshal Zhukov St., Russia

<sup>2</sup> Arctic State Agrotechnological University; 3, Sergelyakhskoe Shosse, Yakutsk, Republic of Sakha

<sup>3</sup> Petrozavodsk State University; 33, Lenin Ave., Petrozavodsk, Republic of Karelia

<sup>4</sup> Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>а</sup> pomiguev.ias@yandex.ru, <sup>б</sup> ola.ola07@mail.ru, <sup>с</sup> silver73@inbox.ru, <sup>д</sup> tihonov@petsu.ru, <sup>е</sup> ivanovva55@mail.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6368-3967>; <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>; <sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>;

<sup>д</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>; <sup>е</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0707-972X>

Received 28.01.2021, accepted 04.02.2021

*In the process of harvesting industrial wood, 20–30% of biomass remains in the felling area, which is easy to process into chips using mobile chippers. In the last 20 years, installations have appeared that allow to process chips into small-format fuel briquettes in the conditions of a forest terminal. This direction is developed in Sweden and Finland. The technology for processing logging waste involves crushing them in chippers, crushing the resulting chips into small fractions, up to a length of no more than 8 mm, drying to a moisture content of 10%, and briquetting the chips into fuel briquettes with a density of 800 kg / m<sup>3</sup>. One forest terminal can process 50 thousand m<sup>3</sup> of logging waste per year. It should be taken into account that in 1–2 years the forest terminal will be relocated to a new logging site. The essence of the concept proposed by the authors is that logging waste generated in the forest terminal goes to a gas generator, where generator (wood) gas is formed. Thermal energy is obtained from the generator gas obtained during combustion, which is converted into electricity. The existing stationary installations for burning wood chips and sawdust are stationary and are not applicable in the conditions of the forest terminal. In order to use them in a forest terminal, it is necessary to change the structure of the raw materials loaded into them. From the chipper comes raw material with a length of 3 to 30 mm, so their combustion in the installation will be uneven. This necessitates the supply of raw materials of a more uniform structure, i.e. preliminary briquetting. In this work, the technology of obtaining fuel briquettes from raw materials of different sizes is considered, as well as the technique, equipment and results of an experimental study of their physical properties.*

**Keywords:** fuel briquettes; forest terminals; physical and mechanical properties; logging waste.

**Введение.** В России в процессе заготовки деловой древесины в лесном терминале остается 20–30 % биомассы, включая неиспользуемую древесину осины и березы. Эти отходы состоят из вершинной части дерева, сучьев и частей ствола, имеющих дефекты. В некоторых случаях сюда относится древесина пней. Часть этих отходов измельчают на рубительных машинах, и полученную щепу транспортируют щеповозами к заводам по производству плит с большим плечом перевозки. Оставшуюся часть отходов либо сжигают, либо закапывают. Если учесть, что в 1 м<sup>3</sup> щепы объем собственно древесины составляет 20 %, становится очевидным, что перевозить щепу невыгодно.

В последние 20 лет появились установки, позволяющие в условиях лесного терминала перерабатывать щепу в мелкоформатные топливные брикеты (пеллеты) [1–3]. Это направление развито в Швеции, Финляндии, производятся такие установки и в России (ООО «Лесинтех»).

Во всех странах с развитой деревообработкой имеются предприятия, работающие на древесных отходах и производящих топливные брикеты различного назначения [4–8]. Сырьем для этих предприятий служат лесосечные отходы [9; 10].

Технология измельчения лесосечных отходов предусматривает измельчение их в мобильных рубительных машинах, транспортировку полученной щепы на нижний склад, дробление на мелкие фракции на стационарной рубительной машине до длины не более 8 мм, сушку до влажности 10 % и брикетирование щепы и опилок в топливные брикеты плотностью 800 кг/м<sup>3</sup> [11–15]. Особенностью данной технологии является то, что для ее реализации требуется стационарное отопляемое помещение с площадью не менее 600 м<sup>2</sup> и высокие требования к исходному сырью для производства брикетов. То же самое относится к производству пеллет [16–18].

В Российской Федерации, при объеме лесозаготовок около 500 млн м<sup>3</sup> древесины, на лесосеках и лесных терминалах образуется порядка 100 млн м<sup>3</sup> лесосечных отходов. Реально на одном терминале можно перерабатывать в год 50 тыс. м<sup>3</sup> отходов. При этом необходимо учитывать, что через 1–2 года лесной терминал перебазируется на новое место лесозаготовки.

Суть предлагаемой в статье концепции заключается в том, что отходы лесозаготовки, образующиеся в лесном терминале, поступают в газогенератор, где образуется генераторный (древесный) газ. Из получаемого при сго-

рании генераторного газа получают не тепло и горячую воду, а преобразуют его в электроэнергию. Существующие стационарные установки сжигания щепы и опилок являются стационарными и неприменимы в условиях лесного терминала [10; 11]. Для того, чтобы их использовать в этих условиях, необходимо изменить структуру загружаемого в них сырья. Из рубительной машины поступает сырье длиной от 3 до 30 мм, поэтому сжигание их в установке будет происходить неравномерно. Это вызывает необходимость подачи сырья более однородного фракционного состава, т. е. предварительного брикетирования. Хотя теория брикетирования уже достаточно хорошо разработана [19; 20], эффективных оборудования и технологии переработки разнородного по размерам сырья в брикеты пока еще нет [21–23].

*Цель работы:* в настоящей работе сделана попытка обосновать технологию получения топливных брикетов из разнородного по размерам сырья для сжигания в газогенераторах и экспериментальным путем изучить физические свойства получаемых топливных брикетов.

*Материалы и методы исследования.* Для получения данных использовались лабораторный эксперимент и статистическая обработка получаемой при проведении эксперимента информации.

**Результаты исследования.** Общая схема получения брикетов представлена на рис. 1.

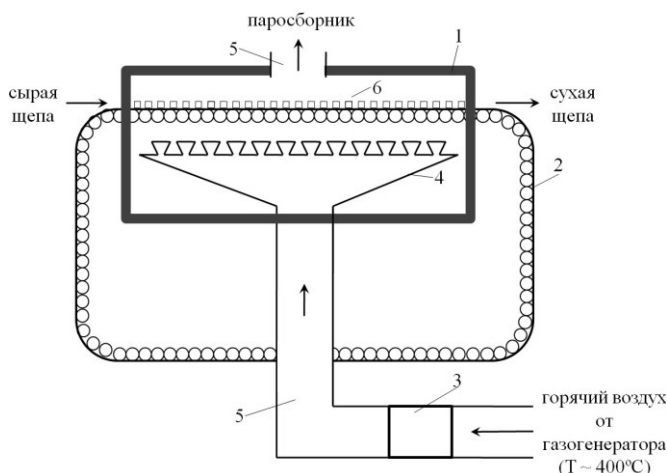
Позиции 1 и 2 на рис. 1 мы не рассматриваем, они широко известны. Сушильная камера (поз. 3) предназначена для сушки щепы от влажности 60–80 % до влажности 15–25 % методом «кипящего слоя». Технология и оборудование таких сушилок хорошо известны [10; 11], поэтому ограничимся только общей схемой, представленной на рис. 2.



**Рис. 1.** Схема получения топливных брикетов

Как видно на рис. 2, время сушки щепы, т. е. скорость движения ленточного транспортера, определяет-

ся экспериментально и должно составлять 5–7 мин при температуре воздуха, подаваемого на щепу 150–200 °С.



**Рис. 2.** Схема сушильной камеры: 1 — теплоизолированная камера; 2 — ленточный транспортер; 3 — вентилятор; 4 — рассеиватель воздуха; 5 — воздуховоды; 6 — щепа

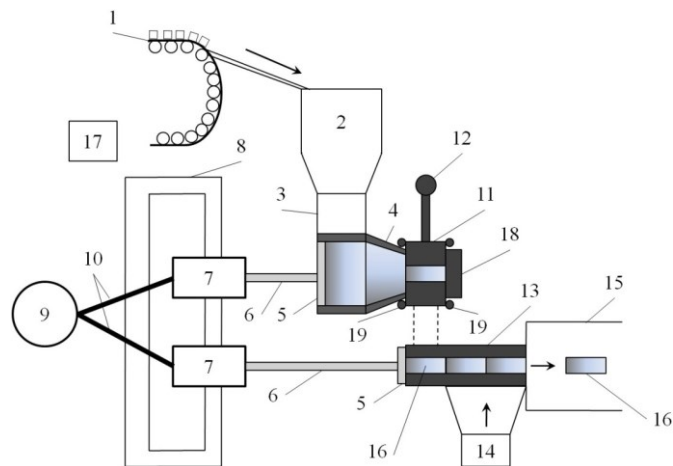
Наиболее ответственным узлом линии по производству брикетов является установка брикетирования, схема которой представлена на рис. 3.

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 охлаждения 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 рубительных машинах различного класса, а также повысить равномерность и скорость выделения газов в газогенераторе. Техническая характеристика установки приведена в табл. 1.

Используемая в экспериментах щепа состояла на 80 % из древесины сосны и на 20 % из древесины березы.

Теплота сгорания брикетов согласно [15] определяется как низшая теплота сгорания топлива в рабочем состоянии. Испытания образцов по серии опытов проводилось по ГОСТ 147 при помощи калориметра сгорания бомбового АБК-1, который представляет собой

короб со встроенным микропроцессором в едином корпусе, позволяющим осуществлять управление процессом измерения теплоты сгорания топлива, обработку полученных данных и занесение их в архив. Диапазон измерения энергии сгорания твердого топлива — 12...40 кДж. Пределы допускаемой относительной погрешности калориметра  $\pm 0,1$  %.



**Рис. 3.** Установка брикетирования щепы: 1 — ленточный транспортер; 2 — бункер; 3 — дозатор; 4 — конус; 5 — пуансон; 6 — шток гидроцилиндра; 7 — гидроцилиндр; 8 — рама пресса; 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

**Таблица 1.** Техническая характеристика установки брикетирования

Наименования показателя	Размерность	Значения
Размеры древесных частиц,	мм	3
	мм	30
Влажность частиц	%	15–25
Содержание зелени, не более	%	20
Размеры брикета диаметр	мм	90
	мм	100
Масса брикета	кг	0,7
Плотность брикета	кг/м <sup>3</sup>	750–800
Усиление гидроцилиндра	т	50
Габариты установки: длина	м	4
	м	1,6
	м	1,4
Масса установки	т	2,9
Производительность	кг/ч	56

Взвешивание навесок массой 1 г проводилось в соответствии с требованиями ГОСТ 147 на весах лабораторных 2-го класса точности ВЛР-200 с наибольшим пределом взвешивания 200 г и погрешностью взвешивания по шкале  $\pm 0,15$  мг. Затем аналитическая проба помещалась в калориметрическую бомбу, которая заполнялась кислородом при заданном давлении, после чего она помещалась в калориметрический сосуд, который заполнялся водой и устанавливался в калори-

метрический блок с закрывающейся крышкой, на которой расположены контакты цепи поджига, соединяющие бомбу с устройством поджига и термометр калориметрического сосуда. Количество теплоты, выделившейся при горении, пропорционально величине энергии сгорания вещества. Калориметр был подключен к персональному компьютеру, программа расчета результата измерения удельной теплоты сгорания топлива проводила коррекцию результата с последующим вычислением низшей теплоты сгорания в соответствии с требованиями ГОСТ 147. Результат калориметрического опыта выводился в виде протокола на монитор компьютера.

Механическая плотность брикетов определялась не по стандартной методике ГОСТ 55110-2012, а по методике испытаний натуральной древесины на сжатие вдоль волокон. Ввиду малой прочности брикета на прочность испытывался весь брикет, причем сжатие проводилось в направлении прессования.

Прочность определялась через 10 мин после прессования брикета и определялась по форме:

$$\sigma = \frac{P}{\pi r^2}, \quad (1)$$

где  $P$  — нагрузка при которой разрушается брикет, кг;  $r$  — радиус брикета, см.

Зольность определялась по ГОСТ Р 54185-2010 «Биотопливо твердое. Определение зольности». Для определения зольности использовали по две аналитические пробы биотоплива для всей серии опытов, отобранные по ГОСТ Р 54185-2010. Зольность определяли расчетным путем, исходя из массы остатка, образовавшегося после сжигания навески биотоплива в муфельной печи при свободном доступе воздуха и температуре  $(550 \pm 10)^\circ\text{C}$ . Зольность из сухой пробы, %, рассчитывали по формуле:

$$A^d = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \frac{100}{100 - W^a}, \quad (2)$$

где  $m_1$  — масса пустого тигля, г;  $m_2$  — масса тигля с навеской пробы, г;  $m_3$  — масса тигля с зольным остатком, г;  $W^a$  — массовая доля влаги в аналитической пробе, %.

Результаты испытаний вычисляли до 0,01 %. За окончательный результат испытаний принимали среднее арифметическое значение результатов двух параллельных определений. Плотность и влажность брикетов определялась по ГОСТ 16483.1-84 и ГОСТ 16483.7-71 сразу после выпрессовки из матрицы.

Основное назначение изготовления топливных брикетов — получение однородного сырья для сжигания в газогенераторе для равномерного получения генераторного газа с одинаковой теплотворной способностью. Полученные брикеты в пресс-грануляторе по транспортеру попадают в бункер газогенератора. В одном бункере должно скопиться 25 брикетов размерами: диаметр 100 мм, высота 120 мм, масса 0,7 кг. Общая масса брикетов, загружаемых в топку газогенератора  $25 \times 0,7 = 17,5$  кг. Поскольку время прессования 1 брикета составляет 1 мин, то время между получением брикета и попаданием его в топку составит 25 мин. Рассмотрим факторы, влияющие на брикетирование:

1. Состав сырья принимаем постоянным. Это щепа без фракционирования размерами длина 3–30 мм, шириной 1–15 мм, толщиной 1–10 мм. В этой щепе могут присутствовать 1–3 % опилок.

2. Влажность щепы задается параметрами сушильной камеры, и для экспериментов принимаем диапазон от 5 до 30 %.

3. Плотность брикета берем в диапазоне 500–1000 кг/м<sup>3</sup>, для чего массу прессуемой щепы принимаем 500 г, 600 г, 700 г, 800 г.

4. Температура щепы, выходящей из сушилки 80–90 °С, поэтому принимаем ее в процессе прессования  $80 \pm 5$  °С.

5. Давление прессования зависит от плотности брикета, и при постоянной плотности принимаем его постоянным фактором.

6. 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 высоты брикета. За счет упругих свойств древесной щепы сразу после выпрессовки брикета из матрицы его высота увеличивалась на 5–10 мм брикета, затем происходило медленное увеличение высоты брикета до 120–150 мм, после чего в некоторых случаях происходило разрушение брикета.

В качестве вторичных факторов определялась распрессовка (высота) брикета через 25 мин выдержки в комнатных условиях и время до полного разрушения брикета, в часах. Таким образом, «черный ящик» планирования выглядит следующим образом (рис. 4).

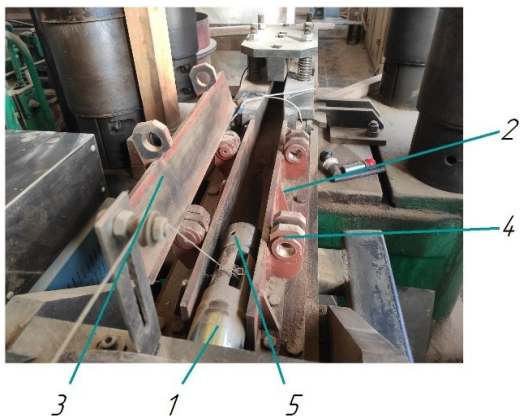
Непосредственное прессование брикетов производилось на механотронном модуле, элементы которого представлены на рис. 5–7. На рис. 5 представлен механотронный модуль без прессующего конуса и матрицы, на рис. 6 — конус и матрица в сборе, на рис. 7 — конус с дозой щепы и матрица за запрессованным брикетом.



Рис. 4. Планирование эксперимента

Получение брикетов происходило следующим образом. Щепа различной влажности, размеров 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>. 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 пресс-форму, крышка закрывалась и шток электроцилиндра проталкивал щепу в приемнике, формируя бри-

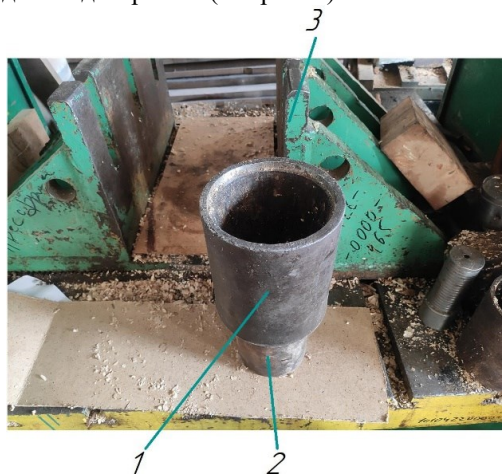
кет высотой 100 мм и диаметром 90 мм. Обратным движением штока брикет в матрице извлекался из пресс-формы и проходил кондиционирование, а в пресс-форму устанавливался конус с новым приемником, и операция повторялась. Напряжение сжатия практически линейно зависит от конечной плотности брикета и в меньшей степени от влажности и температуры, как показано на рис. 8.



**Рис. 5.** Механотронный модуль прессования брикетов: 1 — электроцилиндр; 2 — пресс-форма; 3 — крышка пресс-формы, 4 — механизм фиксации крышки с пресс-формой; 5 — пуансон

Брикеты, полученные при влажности щепы 20 %, рассыпались в течение 10–20 мин после выпрессовки из матрицы, откуда был сделан вывод, что влажность 20 % неприемлема. Брикеты, полученные при влажности 15 %, рассыпались через 2 ч, а брикеты, полученные при влажности 10 %, — через 1 сутки. Отсюда вывод, влажность щепы должна быть в интервале 10–15 %.

Возникает вопрос, почему влажность щепы нельзя снизить до 5 %, ведь тогда брикеты вообще бы не рассыпались? Дело в том, что требования изготовления брикетов в условиях лесного терминала предполагают, что операция сепарации щепы по качественным характеристикам отсутствует, а, следовательно, понижение влажности щепы ниже 10 % будет означать, что мелкая щепка уже пересохнет и при температуре воздуха порядка 200 °С загорится. Фракционный состав щепы приведен на диаграмме (см. рис. 9).



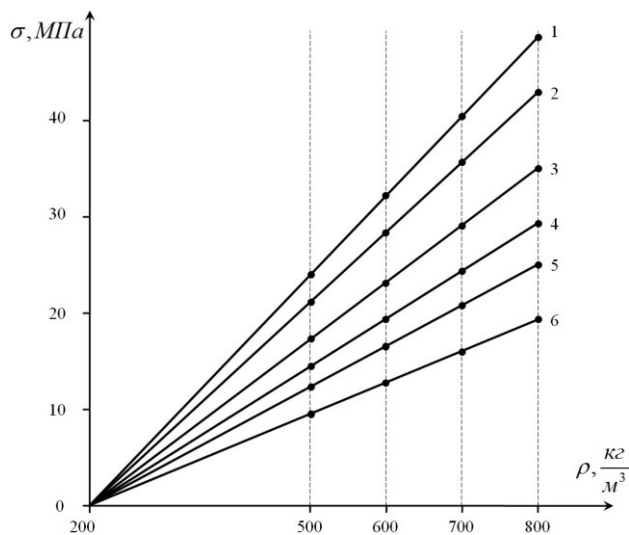
**Рис. 6.** Узлы прессования механотронного модуля: 1 — прессующий конус; 2 — матрица; 3 — пресс-форма

Дальнейшее направление исследований состояло в том, чтобы определить условия, при которых увеличение объема брикета после выпрессовки из матрицы было минимальным. При этом установлено, что наибольшая распрессовка происходит в направлении прессования, в поперечном направлении диаметр брикета увеличивается сразу после выпрессовки на 2–3 мм и далее не меняется вплоть до расслоения брикета.

Высота брикета, т. е. размер в направлении прессования является определяющей величиной, влияющей на его стабильность. 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>. Отсюда делаем вывод, что максимально возможное сохранение плотности брикета и максимальный выход по массе будет реализовываться только для плотности 700 кг/м<sup>3</sup>, т. е. когда масса засыпаемой порции щепы составляет 700 г.



**Рис. 7.** Прессующий конус и матрица с древесиной: 1 — конус; 2 — щепка; 3 — матрица; 4 — прессованный брикет



**Рис. 8.** Зависимость конечной плотности брикетов от удельного давления: 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

Как видно на рис. 11, оптимальными параметрами технологии получения брикетов из нефракционированной щепы на лесозаготовках следует считать влажность щепы 10 %, температуру 80 °С.

Немаловажное значение для формоустойчивости брикетов имеет время выдержки в матрице спрессованного брикета, как видно на рис. 12 и в табл. 2.

Восстановление размеров по высоте брикетов показано на рис. 10.

Графически рис.10 иллюстрируется рис. 11.

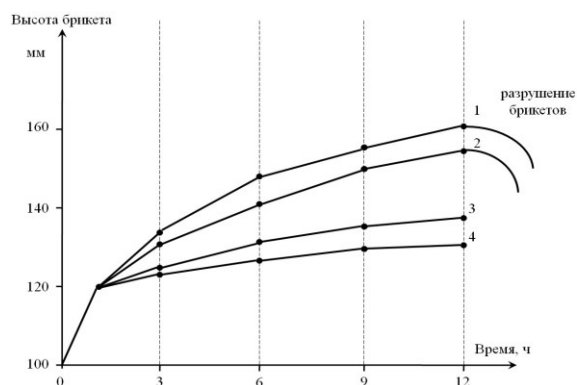
Полученные данные позволили получить оптимальный режим получения «короткоживущих» топливных брикетов, представленный в табл. 3.



**Рис. 9.** Фракционный состав щепы по длине частиц: 1 — опилки; 2 — стружка; 3 — мелкая щепа; 4 — кондиционная щепа; 5, 6 — крупная щепа



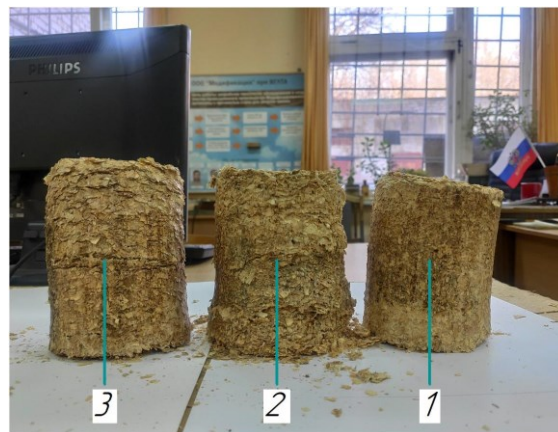
**Рис. 10.** Изменение высоты брикетов при хранении: 1 — 5 мин; 2 — 0,5 ч; 3 — 2 ч; 4 — 24 ч. Брикеты получены при влажности 10 %, температуре 80 °С, времени выдержки в матрице 12 мин



**Рис. 11.** Увеличение высоты брикетов в зависимости от времени хранения: влажность 15 %, температура 20 °С; 2 — влажность 15 %, температура 80 °С; 3 — влажность 10 %, температура 20 °С; 4 — влажность 10 %, температура 80 °С

Из полученных по режимам, указанными в табл. 4.2 партии брикетов путем данных по 8 брикетам были получены показатели свойств брикетов, приведенные в табл. 4.

Как видно из табл. 4, все показатели свойств брикетов, кроме зольности находятся в пределах нормативов. Повышенная зольность объясняется присутствием земли, песка и других инородных включений, вследствие волочения отходов лесозаготовки.



**Рис. 12.** Формоизменение брикетов в зависимости от времени выдержки в матрице: 1 — 1 мин; 2 — 3 мин; 3 — 6 мин

**Таблица 2.** Высота брикета, полученного при влажности щепы 10 %, температура 80 °С после выдержки в матрице

№	Высота брикета плотностью		Время выдержки, min
	600 кг/м <sup>3</sup>	700 кг/м <sup>3</sup>	
1	140	140 (разрушение)	1
2	130	135	2
3	120	125	3
4	115	120	4
5	115	120	5
6	115	120	6

**Таблица 3.** Оптимизированный режим прессования топливного брикета из нефракционированной древесной щепы (рекомендуемый)

Наименование показателей	Ед.изм	Значение
Плотность брикета	кг/м <sup>3</sup>	700
Влажность щепы	%	10
Удельное давление	МПа	30–40
Температура щепы	°С	80–100
Размер щепы по длине	мм	3–35
Время прессования	с	20
Время выдержки в матрице	мин	3
Время между получением брикета и попаданием в топку	мин	25

**Таблица 4.** Показатели свойств топливных брикетов (усредненные)

№	Наименование показателя свойства топливного брикета	Единицы измерения	Значение
1	Плотность	кг/м <sup>3</sup>	700
2	Влажность	%	10
3	Теплотворная способность	МДж/кг	16

*Литература*

- Григорьев И.В. Технологические процессы лесосечных работ с углубленной обработкой древесины // Февральские чтения: сб. материалов науч.-практической конф. проф.-препод. состава Сыктывкарского лесного ин-та по итогам науч.-исследовательской работы в 2015 г. Сыктывкар, 2016. С. 121–126.
- Григорьев И.В., Григорьева О.И., Никифорова А.И., Глуховский В.М. Перспективные направления развития технологических процессов лесосечных работ // Лесная и деревообрабатывающая пром-сть. 2016. № 2 (184). С. 109–116.
- Волкова В.Д., Петри В.Н. К вопросу о роли воды при брикетировании пресс-материалов из древесных частиц // Древесные плиты и пластики: межвузовский сб. науч. трудов. Свердловск, 1973. Вып. XXX. С. 94–98.
- Сафонов А.О., Зотова Е.В. Анализ методик оценки физико-механических и тепловых характеристик древесных пеллет // Лесотехнический журнал. 2014. № 5(13). С. 113–126.
- Сафонов А.О., Платонов А.Д., Зотова Е.В. Аналитическое исследование параметров, определяющих технологию производства древесных пеллет // Лесотехнический журнал. 2014. № 5 (13). С. 127–132.
- Сафонов А.О., Зотова Е.В. Пути повышения теплотворной способности древесных пеллет // Вестн. ТОГУ. 2014. № 4 (35) С. 139–142.
- Шамаев В.А., Зотова Е.В. Использование фаутной древесины в производстве топливных гранул (пеллет) // Наука и технологии в современном мире: традиции и инновации: материалы II Всерос. науч.-практической конф. с междунар. участием. Новосибирск: Изд-во Сибирского независимого ин-та, 2015. С. 137–141.
- Шамаев В.А., Зотова Е.В. Сертификация топливных древесных гранул в рамках программы устойчивого экологического развития // Современные проблемы экологии: тезисы докл. XIII Междунар. науч.-технической конф. Тула: Изд-во «Инновационные технологии», 2015. С. 15–18.
- Глуховский В.М., Григорьев И.В. Оборудование и технологии для производства брикетов // Лесная индустрия. 2016. № 12 (104). С. 42–49.
- Модин Н.А., Ерошкин А.Н. Брикетирование измельченной древесины и древесной коры. М.: Лесная пром-сть, 1971. 111 с.
- Дедюкин В.Г., Бурындин В.Г., Мухин Н.М., Артемов А.В. Получение изделий прессованием в закрытых прессформах из древесных отходов без добавления связующих // Лесной журнал. 2005. № 1. С. 90–94.
- Артемов А.В., Глухих В.В., Бурындин В.Г., Дедюкин В.Г. Исследование физико-механических свойств пластиков, полученных методом прессования // Лесной журнал. 2009. № 6. С. 101–106.
- Гомонай М.В. Технология переработки древесины. М.: МГУЛ, 2001. 231 с.
- Алимов В.А., Говоров А.И., Пономарев А.И. Сушка древесных отходов перед брикетированием // Деревообрабатывающая пром-сть. 1991. № 1. С. 8–9.

4	Механическая прочность	МПа	1,4
5	Зольность	%	3,3

**Выводы.** Для условий лесных терминалов разработана технология получения топливных брикетов из нефракционированной щепы для сжигания их после получения в течение 0,5 ч. Топливные брикеты обладают рядом свойств, характеризующих их как полноценное древесное топливо.

- Гомонай М.В. Переработка древесного сырья на лесосеке // Лесная пром-сть. 1998. № 4. С. 17–20.
- Руководящие технические материалы по производству технологической щепы из отходов лесопиления: утв. Минлесбумпромом СССР 22.12.83. Введ. с 01.07.84. Архангельск: ЦНИИМОД, 1984. 88 с.
- Власов Ю.Н., Куницкая О.А. Оптимальные параметры сырья для производства топливных брикетов из древесины // Лесозаготовка и комплексное использование древесины: сб. статей Всерос. науч.-практической конф. (10 марта 2020 г.). Красноярск, 2020. С. 45–49.
- Власов Ю.Н., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Хитров Е.Г., Рунова Е.М. Моделирование физико-механических свойств сырья для производства топливных брикетов // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 2 (46). С. 40–46.
- Куницкая О.А., Григорьев И.В., Мануковский А.Ю. Технико-экономическое сравнение производства топливных брикетов и пеллет из древесины // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2020. № 57. С. 40–43.
- Чибирев О.В., Куницкая О.А., Григорьев М.Ф. Расчет потребного давления прессования опилок при формировании брикета // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 2. С. 22–25.
- Пекарец А.А., Ерохина О.А., Новожилов В.В., Мандре Ю.Г., Аким Э.Л. Упруго-релаксационные свойства древесины лиственницы и их роль при получении древесных и древесно-угольных брикетов // Лесной журнал. 2020. № 1. С. 200–208.
- Петринчик В.А., Царев А.С. Проблемы использования топливных брикетов в коммунальной теплоэнергетике малых населенных пунктов // Лесной журнал. 2014. № 3. С. 139–144.
- Чибирев О.В., Куницкая О.А., Давтян А.Б. Анализ исследований процесса брикетирования отходов лесопереработки на гидравлическом прессовом оборудовании // Resources and Technology. 2019. V. 16. № 2. P. 97–118.

*References*

- Grigor'ev I.V. Technological processes of forest work with in-depth wood processing // Fevral'skie chteniya: sb. materialov nauch.-prakticheskoy konf. prof.-prepod. sostava Syktyvkarskogo lesnogo in-ta po itogam nauch.-issledovatel'skoj raboty v 2015 g. Syktyvkar, 2016. P. 121–126.
- Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I., Nikiforova A.I., Gluhovskij V.M. Perspective directions of development of technological processes of logging operations // Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya prom-st'. 2016. № 2 (184). P. 109–116.
- Volkova V.D., Petri V.N. On the role of water in the briquetting of press materials from dry particles // Drevesnye plity i plastiki: mezhvuzovskij sb. nauch. trudov. Sverdlovsk, 1973. Vyp. XXX. P. 94–98.
- Safonov A.O., Zotova E.V. Analysis of methods for evaluating the physical, mechanical and thermal characteristics of wood pellets // Forestry Engineering Journal. 2014. № 5 (13). P. 113–126.

5. Safonov A.O., Platonov A.D., Zotova E.V. Analytical study of parameters determining the technology of wood pellet production // *Forestry Engineering Journal*. 2014. № 5 (13). P. 127–132.
6. Safonov A.O., Zotova E.V. Ways to increase the heat-producing capacity of wood pellets // *Vestn. TOGU*. 2014. № 4 (35) P. 139–142.
7. SHamaev V.A., Zotova E.V. Use of fault wood in the production of fuel Gras-zero (pellets) // *Nauka i tekhnologii v sovremennom mire: tradicii i innovacii: materialy II Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem*. Novosibirsk: Izd-vo Sibirskogo nezavisimogo in-ta, 2015. P. 137–141.
8. SHamaev V.A., Zotova E.V. Certification of top-quality wood pellets in the framework of the sustainable environmental development program: tezisy dokl. XIII Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf. Tula: Izd-vo «Innovacionnye tekhnologii», 2015. P. 15–18.
9. Gluhovskij V.M., Grigor'ev I.V. Equipment and technologies for production of briquettes // *Lesnaya industriya*. 2016. № 12 (104). P. 42–49.
10. Modin N.A., Eroshkin A.N. Briquetting of crushed wood and bark. M.: Lesnaya prom-st', 1971. 111 p.
11. Dedyukin V.G., Buryndin V.G., Muhin N.M., Artemov A.V. Obtaining products by pressing in closed molds from wood waste without adding binders // *Forest Journal*. 2005. № 1. P. 90–94.
12. Artemov A.V., Gluhih V.V., Buryndin V.G., Dedyuhin V.G. Investigation of the physical and mechanical properties of plastics obtained by pressing // *Forest Journal*. 2009. № 6. P. 101–106.
13. Gomonaj M.V. Technology of wood processing. M.: MGUL, 2001. 231 p.
14. Alimov V.A., Govorov A.I., Ponomarev A.I. Drying of wood waste before briquetting // *Derevoobrabativaushaya promishlennost' (Woodworking industry)*. 1991. № 1. P. 8–9.
15. Gomonaj M.V. Processing of wood raw material in the cutting area // *Lesnaya prom-st'*. 1998. № 4. P. 17–20.
16. Guidelines for the production of technological chips from sawn wood waste: utv. Minlesbumpromom SSSR 22.12.83. Vved. s 01.07.84. Arhangel'sk: CNIIMOD, 1984. 88 p.
17. Vlasov YU.N., Kunickaya O.A. Optimal parameters of raw materials for the production of fuel briquettes from wood // *Lesoekspluatatsiya i kompleksnoe ispol'zovanie drevesiny: sb. statej Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (10 marta 2020 g.)*. Krasnoyarsk, 2020. P. 45–49.
18. Vlasov YU.N., Grigor'ev I.V., Kunickaya O.A., Hitrov E.G., Runova E.M. Modeling of physical and mechanical properties of raw materials for the production of fuel briquettes // *Systems. Methods. Technologies*. 2020. № 2 (46). P. 40–46.
19. Kunickaya O.A., Grigor'ev I.V., Manukovskij A.YU. Technical and economic comparison of the production of fuel briquettes and pellets from wood // *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*. 2020. № 57. P. 40–43.
20. CHibirev O.V., Kunickaya O.A., Grigor'ev M.F. The calculation of the required pressure pressing OPI-Lok in the formation of briquettes // *Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya (Repair, Reconditioning, Modernization)*. 2019. № 2. P. 22–25.
21. Pekarec A.A., Erohina O.A., Novozhilov V.V., Mandre YU.G., Akim E.L. Elastic-relaxation properties of larch wood and their role in the production of wood and wood-coal briquettes // *Forest Journal*. 2020. № 1. P. 200–208.
22. Petrinchik V.A., Carev A.S. Problems of using fuel briquettes in municipal heat power engineering of small settlements // *Forest Journal*. 2014. № 3. P. 139–144.
23. CHibirev O.V., Kunickaya O.A., Davtyan A.B. Analysis of studies of the process of briquetting wood processing waste on hydraulic press equipment // *Resources and Technology*. 2019. V. 16. № 2. P. 97–118.