

Оптимизация производства топливных брикетов из измельченной древесины

О.А. Куницкая^{1а}, В.А. Макуев^{2б}, Т.Н. Стородубцева^{3с}, О.Н. Калита^{4д},
Е.В. Михайленко^{5е}, Н.О. Задраускайте^{6ф}

¹ Арктический государственный агротехнологический университет, Сергеляхское шоссе, 3, Якутск, Республика Саха (Якутия), Россия

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), ул. 1-я Институтская, 1, Мытищи, Россия

³ Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Россия

⁴ Тихоокеанский государственный университет, ул. Тихоокеанская, 13б, Хабаровск, Россия

⁵ Ухтинский государственный технический университет, ул. Первомайская, 13, Ухта, Республика Коми, Россия

⁶ Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, 17, Архангельск, Россия

^а ola.ola07@mail.ru, ^б makuev@mgul.ac.ru, ^с tamara-tns@yandex.ru, ^д o.n.kalita@mail.ru,

^е emihaylenko@ugtu.net, ^ф n.zadrauskaite@narfu.ru

^а <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, ^б <https://orcid.org/0000-0000-5905-8923>, ^с <https://orcid.org/0000-0002-4925-8542>,

^д <https://orcid.org/0000-0003-3360-3329>, ^е <https://orcid.org/0000-0002-5915-7139>, ^ф <https://orcid.org/0000-0002-4248-7860>

Статья поступила 05.09.2022, принята 19.09.2022

Введенные против Российской Федерации после начала специальной военной операции санкции, а также ответные санкции со стороны нашей страны существенно затруднили сбыт продукции биотопливных компаний, производящих продукцию из отходов деревообрабатывающих предприятий. До марта 2022 г. этот сегмент лесной промышленности России показывал уверенный рост в свете политики «зеленой» энергетики западных стран. В настоящий момент экспорт топливных гранул (пеллет) существенно сократился. Но рынок топливных брикетов не только не сократился, но и показывает уверенный рост, что во многом связано с особенностями географии расположения традиционных потребителей этого вида продукции, которыми в основном являются дружественные страны. В этой связи производство топливных брикетов из измельченной древесины в Российской Федерации растет, и достаточно остро встают вопросы оптимизации данного вида производства. Данная оптимизация во многом заключается в выборе оптимального вида производимой продукции, оборудования основного потока, исходя из вида, качества и количества исходного сырья, а также логистики готовой продукции. Помимо решения вопроса эффективной утилизации отходов деревообрабатывающих производств, в определенных природно-производственных условиях брикетирование может решать проблему эффективной утилизации порубочных остатков. В статье представлен анализ аспектов оптимального выбора при проектировании (компоновке) линии в данной области. Авторы выражают особую благодарность компании «Завод Эко Технологий» за ценную информацию, использованную при подготовке данной статьи.

Ключевые слова: биотопливо; топливные брикеты; древесные отходы; порубочные остатки; системы машин.

Optimization of the production of fuel briquettes from chopped wood

O.A. Kunickaya^{1а}, V.A. Makuev^{2б}, T.N. Storodubtseva^{3с}, O.N. Kalita^{4д},
E.V. Mihajlenko^{5е}, N.O. Zadrauskajte^{6ф}

¹ Arctic State Agrotechnological University; 3 km, 3, Sergelyakhskoe Shosse, Yakutsk, Republic of Sakha

² Mytishchi Branch of Bauman Moscow State Technical University; 1, Institutskaya St., Mytishchi, Russia

³ Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov; 8, Timiryazev St., Voronezh, Russia

⁴ Pacific State University; 13b, Tikhookeanskaya St., Khabarovsk, Russia

⁵ Ukhta State Technical University; 13, Pervomaiskaya St., Ukhta, Republic of Komi

⁶ Northern Arctic Federal University named after M.V. Lomonosov; 17, Severnaya Dvina Emb., Arkhangelsk, Russia

^а ola.ola07@mail.ru, ^б makuev@mgul.ac.ru, ^с tamara-tns@yandex.ru, ^д o.n.kalita@mail.ru,

^е emihaylenko@ugtu.net, ^ф n.zadrauskaite@narfu.ru

^а <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, ^б <https://orcid.org/0000-0000-5905-8923>, ^с <https://orcid.org/0000-0002-4925-8542>,

^д <https://orcid.org/0000-0003-3360-3329>, ^е <https://orcid.org/0000-0002-5915-7139>, ^ф <https://orcid.org/0000-0002-4248-7860>

Received 05.09.2022, accepted 19.09.2022

The sanctions imposed against the Russian Federation after the start of the special military operation, as well as retaliatory sanctions on the part of our country have significantly hampered the sales of products of biofuel companies that produce products from waste wood processing plants. Until March, 2022, this segment of the timber industry in Russia showed steady growth in the light of the "green energy" policy of Western countries. At the moment the export of fuel pellets has decreased significantly. But the market of fuel briquettes has not reduced, but also shows steady growth, which is largely due to the geographical location of traditional consumers of this type of products, which are mainly friendly countries. In this regard, the production of fuel briquettes from shredded wood in the Russian Federation is growing, and the issues of optimization of this type of production are quite acute. This optimization largely lies in choosing the optimal type of production, equipment of the main stream, based on the type, quality and quantity of raw materials, as well as the logistics of the finished product. In addition to solving the problem of effective utilization of woodworking waste, under certain natural-production conditions briquetting can solve the problem of effective utilization of felling residues. The article presents an analysis of the aspects of optimal choice in the design (layout) of the line in this area. The authors would like to express their special gratitude to the company "Eco Technology Plant" for the valuable information used in preparing this article. The work was performed within the framework of the scientific school "Innovative developments in the field of logging industry and forestry".

Keywords: biofuel; fuel briquettes; wood waste; logging residues; machine systems.

Введение. При переработке древесины на различную готовую продукцию образуется большое количество отходов основного производства, представляющих собой кору, опилки, шлифовальную пыль, стружку, отсев щепы, горбыли, рейки, отторцовки, «карандаши» от фанерных кряжей, шпон-рванину и т. д. Примерный баланс древесных отходов приведен на рис. 1.



Рис. 1. Баланс отходов основного производства деревообрабатывающего предприятия [1]

В таблице приведено процентное отношение образования древесных отходов при лесопилении.

Часть получаемых отходов обычно сжигается в насыпном виде (опилки, щепы) в котельных деревообрабатывающих предприятий с получением тепловой энергии, которая расходуется на отопление производственных и административных помещений, сушку пиломатериалов. Иногда часть тепловой энергии реализуется сторонним потребителям, если они находятся неподалеку.

Таблица. Процентное отношение образования древесных отходов при лесопилении

Отходы и потери, %	Способы распиловки бревен	
	Вразвал	С брусковкой
Горбыли	6/6	10
Рейки	-/14	7
Обрезки, вырезки	-/2	2
Опилки	10/12	12
Усушка, распыл	7/7	7
Итого отходов	16/34	31

Примечание. В числителе для необрезных, в знаменателе — для обрезных пиломатериалов.
Источник: [1]

В сельской местности часть кусковых древесных отходов реализуется местному населению в виде дров. Но, поскольку баланс получаемых отходов на деревообрабатывающих предприятиях составляет около 50 % по сырью, не все образующиеся древесные отходы удается эффективно реализовать указанными путями. И тогда отходы основного производства становятся реальной проблемой, начиная засорять территорию (рис. 2), что приводит к существенным штрафам от природоохранных организаций [2].

Цель работы. Сделана попытка проанализировать достоинства и недостатки основных видов топливных брикетов из измельченной древесины и основного обораживания, используемого при их производстве.

Материалы и методы исследования. Для получения дополнительной прибыли многие предприятия производят топливо из прессованных и предварительно измельченных древесных отходов, а также опилок, древесной пыли. Это топливо подразделяется на пеллеты (топливные гранулы) и брикеты [3; 4].

До марта 2022 г. на практике часто вставал первый вопрос — какую линию, пеллетную или брикетную, предпочтительно установить на конкретном деревообрабатывающем предприятии, какой вид продукции из древесных отходов выгоднее производить и по какой технологии [5; 6]. После начала санкционной войны, включающей продукцию лесного комплекса, данный вопрос приобрел новые грани.



Рис. 2. Отходы основного производства лесопильного предприятия

Анализ показывает, что за последние годы принципиально новых технологий и оборудования на рынке производства твердого биотоплива из древесины и отходов деревообработки не появилось.

Отметим, что принцип этих технологий брикетирования измельченной древесины, как, в принципе, и пеллетирования, один и тот же — в результате сжатия под высоким давлением древесной фитомассы разрушаются клетки, освобождается внутриклеточный лигнин, который и является связующим массы и формируется пеллета или брикет.

Дальше идут различные вариации по реализации этого принципа (особенности того или иного вида брикетирования), и нарастает степень автоматизации работы оборудования.

Основным отличием пеллетирования от брикетирования является разница в размерах получаемой готовой продукции. Через узкую фильеру так же проталкивается материал, так же происходит разрушение клеток и высвобождение лигнина.

Принципиально, на выходе получают тот же продукт, что и при брикетировании, даже по свойствам во многом схожий. Основная качественная разница будет в калорийности, примерно на 10 %, в пользу пеллет по сравнению с брикетами. Данная разница обусловлена большей плотностью продукции, получаемой при пеллетировании.

На более качественном оборудовании, обеспечивающем большее рабочее давление, и при более качественном исходном сырье получают более качественную продукцию. Это касается как брикетирования, так и пеллетирования.

Когда на лесопромышленном предприятии приходят к мнению о целесообразности диверсификации основного производства за счет создания участка по производству твердого биотоплива из древесины, необходимо сделать выбор — какой вид топлива лучше производить, пеллеты или брикеты?

При поиске правильного ответа на данный вопрос в каждом конкретном случае надо отталкиваться от возможностей рынка (санкции, логистика [7–9]) и древесное сырье (количество, качество, вид).

Нелишним будет отметить опыт многих стран по выращиванию энергетических лесных плантаций [10–13]. В этом случае сырьем для производства прессованного биотоплива будут не только опилки и обрезки, но тонкомерная древесина, требующая особых подходов.

До начала санкционной войны многих развитых стран с Российской Федерацией, которые и были основным экспортным рынком пеллет, было принято считать, что на топливные пеллеты выше спрос и на них выше цена. При этом де факто маржинальность продукции — пеллет и брикетов — примерно одинакова.

Также необходимо учитывать, что для того, чтобы получить качественные пеллеты, которые будут соответствовать всем требованиям стандартов EN+, ENplus-A1 и др., необходимо использовать только качественное сырье и качественное, а значит, достаточно дорогостоящее оборудование.

Поэтому доходный бизнес в пеллетном производстве, имеющий маржинальность на 10–20 % больше, чем при производстве брикетов, начинался от объема выпуска 3 т/ч и начальных капиталовложений от 3

млн €. Тогда можно было получить корабельные партии продукции, выстроить эффективную логистику, получать стабильные большие контракты.

Меньшие объемы производства пеллет не могли дать такую стабильную прибыль, и она не превышала доходность от брикетного производства.

Можно производить промышленные пеллеты, у которых требования к качеству исходного древесного сырья много меньше, допускается и наличие коры. Но остальная (и основная) часть себестоимости их производства (затраты на эксплуатацию пеллетной линии) не меньше, чем у высококачественных, а продажная стоимость меньше.

В настоящее время (с июля 2022 г.), после введения санкций против Российской Федерации, а также введения ответных санкций, экспорт ранее очень востребованных пеллет в так называемые эчочувствительные страны, которые практически все ввязались в санкционную войну, замер. Многие масштабные производства по выпуску высококачественных пеллет перешли на производство «на склад» в ожидании лучших времен. Благо, что у больших предприятий обычно достаточно емкие склады.

Сложившаяся ситуация дала преимущество мелким производителям пеллет, работающим не на самом дорогом и качественном оборудовании, соответственно производящим пеллеты среднего и ниже среднего качества, особенно по транспортным свойствам. Их продукция «далеко не едет» и пользуется достаточно устойчивым спросом на внутреннем рынке, например, в качестве наполнителя для кошачьих туалетов. Это достаточно емкий и при этом стабильный рынок.

При этом рынок топливных брикетов, которые традиционно продавались и на внутреннем рынке, и во многих азиатских странах, не только не уменьшился, а наоборот вырос примерно на 10–15 % к августу 2022 г. Это связано и с увеличением спроса на уже традиционных для этого вида топлива рынках, и с открытием новых рынков, выстраиванием новых логистических цепочек. В качестве примера, увеличила объемы потребления Турции, открылся новый для данного вида продукции рынок в Арабской Республике Египет. Причем можно прогнозировать, что с развитием мирового энергетического кризиса, ростом цены на ископаемое топливо рынок топливных брикетов в дружественных странах, традиционно покупающих в России этот вид топлива, будет только расти.

Значительным преимуществом брикетного производства является то, что оно требует значительно меньших начальных инвестиций, чем пеллетное, за счет более простой технологической цепочки. Данное утверждение верно при условии, что и пеллетное, и брикетное производства базируются на качественном, а значит, достаточно дорогостоящем оборудовании.

У пеллетного пресса требования к влажности сырья составляют 6–8 %, а фракция должна укладываться в диапазон 1–3 мм. У брикетного пресса соответственно по влажности — 0–12 %, а размер фракции — от шлифовальной пыли (микрон) до 10 мм.

Поэтому с точки зрения инвестиций в подготовку древесного сырья себестоимость топливных брикетов намного ниже, чем пеллет.

С точки зрения производства топливных брикетов по-прежнему наиболее распространены гидравлическое (холодное) брикетирование (брикеты формы параллелепипеда), экструзионное и механическое (ударное) брикетирование (цилиндрические брикеты).

Брикеты, произведенные экструзионным прессованием, не имеют высокой плотности и не составляют большой конкуренции другим двум типам брикетирования. Это также связано с тем, что стоимость шнека для экструзионного пресса составляет 200–1500 €. На Западе шнеки изготавливают из дорогих высоколегированных, особо износостойких сталей с особыми режимами термообработки и специальными покрытиями. Такой шнек стоит 1 500 €. При этом заявляемый производителем ресурс шнека составляет 200–270 ч. Производительность таких прессов небольшая — 0,5–1,0 т/ч.

Мировыми лидерами в области производства прессов являются компании RUF (для гидравлического оборудования) и C.F.NIELSEN (для механического брикетирования).

Сравнивать оборудование этих компаний между собой не совсем корректно, поскольку некоторые свойства лучше у RUF, некоторые — у C.F.NIELSEN.

Рациональный выбор между этими типами оборудования будет прежде всего зависеть от сырьевой базы производства топливных брикетов — объемы, виды отходов, их породный состав, влажность, наличие предварительной окорки, длительность хранения отходов на открытой площадке (особенно в теплый период года) и т. д.

С точки зрения рынка и тот, и другой тип топливных брикетов достаточно востребован. Но производителей цилиндрических брикетов на отечественном рынке намного меньше. Наверное, это связано с более высокими требованиями к брикетируемому сырью и несколько более сложной технологией производства по сравнению с вариантом гидравлического брикетирования.

Некоторым специфическим недостатком цилиндрических брикетов можно считать их более низкий «коэффициент полндревесности ваза» по аналогии с круглыми лесоматериалами.

Гидравлические прессы типа RUF более универсальны. При достаточно большой стоимости такого оборудования они позволяют получить минимальную себестоимость брикетов и минимальный срок окупаемости инвестиций.

При объемах производства топливных брикетов до 1 т/ч гидравлические прессы типа RUF будут наиболее оптимальным решением.

При объемах производства топливных брикетов 1,5–2,0 т/ч прессы механического брикетирования типа C.F.NIELSEN выигрывают и становятся более предпочтительным выбором.

За счет более высокой производительности брикетных прессов C.F.NIELSEN, если пересчитывать инвестиции на тонну готовой продукции, то C.F.NIELSEN будет предпочтительнее примерно на 10 %.

Кроме того, плотность топливных брикетов, получаемых на прессах C.F.NIELSEN, на 5–10 % выше, чем брикетов, получаемых на прессах RUF.

Это ориентировочные цифры, которые можно получить при полном соблюдении требований технологического процесса. К примеру, если на предприятии, что случается достаточно часто, стремясь сэкономить,

берутся настраивать брикетное оборудование своими силами, не привлекая профессиональных наладчиков, не стоит удивляться тому, что результат не соответствует изначальным ожиданиям. Впрочем, это касается не только настройки оборудования для производства топливных брикетов.

Весьма важным рыночным фактором любых топливных брикетов является качество их упаковки. Качественная упаковка позволяет транспортировать брикеты практически в любую точку мира. Как было отмечено выше, некоторое преимущество в упаковке дают брикеты типа RUF за счет своей более удобной для упаковки и транспортировки формы.

На оптимальный выбор брикетного пресса будут также напрямую влиять и качественные характеристики исходного сырья, перечисленные выше. Поскольку, как было отмечено, в основе принципа технологии брикетирования измельченной древесины лежит разрушение клеток древесины за счет высокого давления, высвобождение внутриклеточного лигнина, который является связующим брикета, наличие и количество этого лигнина играет очень важную роль. Например, отходы фанерного производства являются специфическим сырьем для производства топливных брикетов или пеллет именно потому, что фанерные края и, соответственно, отходы фанерного производства неоднократно подвергаются различным видам гидротермической и пьезомеханической обработки в процессе основного производства. В результате количество лигнина в этом сырье значительно меньше, чем в стволовой древесине или отходах лесопиления.

Помимо гидротермической и пьезомеханической обработки, лигнин разлагается под воздействием солнечных лучей, перепадов температуры, воздействия микроорганизмов (биодеструкция). В связи с этим в древесных отходах, которые лежат на открытой площадке более 6 мес, количество лигнина начинает существенно снижаться. Поэтому брикеты из таких отходов формировать значительно сложнее. Обычно такое сырье для производства прессованного биотоплива не используется.

Кроме этого, пока древесные отходы лежат на открытой площадке в теплый период года, они «впитывают» в себя пыль, песок и другие абразивные материалы, которые на них гонит ветер. Это, в свою очередь, приводит к ускоренному износу оборудования линии. Это же касается и неокоренных древесных отходов, поскольку именно в коре наблюдается максимальная концентрация минеральных включений [14; 15].

Соответственно, исходя из количества лигнина, влияет и породный состав отходов. Хвойные и мягколиственные породы брикетируются лучше твердолиственных. Причем, например, дуб, бук, береза на прессах гидравлического брикетирования типа RUF брикетируются без особых проблем. А на прессах механического брикетирования типа C.F.NIELSEN отходы таких древесных пород практически не брикетируются, разве что к этим отходам подмешивать часть хвойных. Но это крайне сложная, практически не выполнимая качественно задача. Поскольку для качественного перемешивания опилок разных древесных пород, помимо точной однородности

по размерной фракции, необходимо специальное, достаточно энергоемкое оборудование.

При брикетировании такого сырья на прессах типа RUF процент брака незначительно увеличится (на 1–2 %), но это не очень страшно. Надо отметить, что современные прессы RUF имеют опцию самонастройки на изменение характеристик поступающего сырья, что позволяет им работать в автоматическом режиме, не снижая качества готовой продукции.

Прессы типа C.F.NIELSEN значительно более требовательны к сырью и не имеют опции самонастройки на изменение его характеристик. Например, требования к влажности сырья у прессов гидравлического брикетирования лежат в пределах 0–12 %, а у прессов механического брикетирования — 6–10 %. Выйти за такой небольшой диапазон совершенно не сложно, и отсутствие функции самонастройки сразу приведет к резкому падению качества брикетов.

В связи с тем, что принцип работы прессов механического брикетирования очень близок к принципу производства пеллет — проталкивание древесной массы через сужающуюся фильеру (даже по форме продукция получается одинаковая, только по размерам поперечного сечения разная — диаметр пеллет 6–8 мм, а цилиндрических брикетов пресса C.F.NIELSEN — 40–100 мм), прессы данного типа очень чувствительны к изменениям характеристик сырья и, как было отмечено, изначально к нему более требовательны.

Так же, как и у пеллетных прессов, прессы механического брикетирования приходится перенастраивать опытным путем при изменении характеристик поступающего сырья, что требует остановки производственной линии. Причем, если ухудшение качества брикетов и-за изменения характеристик поступающего сырья обнаружено по факту, то придется еще и очищать всю цепочку оборудования производственной линии.

Как и для любых лесных машин и оборудования, для брикетных прессов очень важны показатели надежности и возможности организации фирменного сервиса [16]. При правильной эксплуатации и должном обслуживании прессы RUF и C.F.NIELSEN, в принципе, одинаковы, перечни необходимых на складе расходных материалов также мало отличаются.

Безусловно, прессы и гидравлического, и механического брикетирования производят не только компании RUF и C.F.NIELSEN. Есть еще ряд производителей, из Польши, Прибалтики и др. Их оборудование относится к более бюджетному сегменту, но ждать от него таких же характеристик надежности и качества, безусловно, не стоит. Как минимум потому, что ведущие производители рассматриваемого оборудования имеют длительный опыт его производства и возможность вкладывать значительные средства в разработки, направленные на постоянное повышение качества соевой продукции. Более мелкие производители, очевидно, такой возможности лишены.

Важно отметить, что ведущие производители оборудования уделяют очень большое внимание безопасности работающего с ним персонала. Хотя в связи с различиями в российском и, например, европейском законодательстве в области безопасности и охраны труда поставляемое в Российскую Федерацию оборудо-

дование имеет несколько меньшее количество защит — ограничителей и блокираторов.

С точки зрения стоимости владения рассматриваемым оборудованием (запасные части, расходные материалы, сервис) в пересчете на тонну готовой продукции, у прессов RUF, в зависимости от модели, данная цифра составляет 1,4–1,8 €/т, у прессов C.F.NIELSEN — 1,8–2,2 €/т. Хотя, как было отмечено, если еще учитывать производительность, а у C.F.NIELSEN она значительно больше, по этому показателю рассматриваемое оборудование будет примерно одинаковым. Кроме того, отметим, что ассортимент необходимых запасных частей у прессов механического брикетирования значительно меньше, но использование прессов механического брикетирования требует более тщательного отношения к технологической цепочке.

Помимо решения вопроса эффективной утилизации отходов от деревообрабатывающих операций, брикетирование может, в определенных природно-производственных условиях, помочь эффективно решить проблему утилизации порубочных остатков, а также древесины, образующейся при проведении рубок ухода за составом. Не секрет, что во многих регионах Сибири и Дальнего Востока после проведения сплошной рубки лесосека представляет собой сплошной ковер из кроновых частей деревьев, откомлевок, по которому крайне тяжело ходить. При этом, как известно, высыхая, эти порубочные остатки становятся крайне пожароопасными [17; 18], а лесные пожары — широко известная проблема Сибири и Дальнего Востока.

Проблема порубочных остатков, в принципе, двухфакторная. Во-первых, современные лесные машины (харвестеры, форвардеры, скиддеры) не имеют возможности быть агрегатированными устройствами для сбора порубочных остатков в валы, в отличие от уже не выпускающихся гусеничных трелевочных тракторов отечественного производства. Но эту грань проблемы оставим за рамками данного исследования. Во-вторых, при большой удаленности лесосек от потенциальных потребителей транспортировка даже собранных порубочных остатков, например, для энергетических целей, становится нерентабельной ввиду малого коэффициента полнодревесности вала.

И в этом случае могут помочь мобильные комплексы для переработки данной фитомассы в брикеты. Пусть далеко не столь качественные, как из свежих хвойных опилок на стационарном оборудовании, но все же, это будет готовая продукция, которая, например, может частично заменить уголь на ТЭЦ Братска, вокруг которого нам довелось наблюдать большое количество сильно засоренных порубочными остатками лесосек, по примерной аналогии с производителями низкокачественных пеллет, о которых говорилось выше.

Приведенный выше сравнительный анализ способов брикетирования позволяет утверждать, что наиболее оптимальным ведущим оборудованием данного мобильного комплекса является пресс гидравлического прессования типа RUF поскольку у данного способа наименьшие из возможных требования к качеству входящего в переработку древесного сырья.

Надо подчеркнуть, что возможности производства прессованного биотоплива на мобильных линиях подтверждены результатами предыдущих исследований и

промышленной апробацией. Причем производства не только топливных брикетов, но и пеллет [19; 20].

Литература

1. Тамби А.А., Григорьев И.В., Давтян А.Б., Помигуев А.В., Калита О.Н., Григорьев В.И. Технологическая интеграция лесопромышленных предприятий // *Деревообрабатывающая пром-сть*. 2021. № 1. С. 26-37.
2. Григорьев И.В., Григорьева О.И. Основные направления обеспечения экологической безопасности лесозаготовительного производства // *Актуальные направления науч. исследований XXI века: теория и практика*. 2015. Т. 3. № 2-1 (13-1). С. 202-205.
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.
4. Григорьев В.И. Возможности развития импорта российского твердого биотоплива // *Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Шестой Всерос. нац. науч.-практической конф. с междунар. участием (22 мая 2020 г.)*. Петрозаводск, 2020. С. 44-45.
5. Григорьев В.И. Факторы изменения добавленной стоимости в российской лесной промышленности // *Современные проблемы и достижения аграрной науки в Арктике: сб. науч. ст. по материалам Всерос. студенческой науч.-практической конф. с междунар. участием в рамках «Северного форума - 2020» (29-30 сент. 2020 г.) и Междунар. науч. онлайн летней школы - 2020 (6-20 июля 2020 г.)*. Якутск, 2020. С. 276-288.
6. Григорьев В.И., Ермакова Н.А. Трансформация цепочек добавленной стоимости в российской лесной промышленности // *Инновационная экономика*. 2020. № 4 (25). С. 4-19.
7. Григорьев В.И., Ермакова Н.А. Региональная конкурентоспособность и задачи эффективного использования лесных ресурсов Дальнего Востока // *Инновационная экономика*. 2021. № 4 (29). С. 53-68.
8. 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 Междунар. науч.-практической конф. студентов, аспирантов, ученых, пед. работников и специалистов-практиков (Нижегородск, 24 апр. 2020 г.)*. Тюмень, 2020. С. 116-119.
9. Григорьев И.В. Перевозка лесоматериалов по железной дороге // *Потенциал науки и образования: современные исследования в области агрономии, землеустройства, лесного хозяйства: сб. тр. конф. (20 марта 2019 г.)*. Якутск, 2019. С. 5-9.
10. 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 пром-сть*. 2021. № 1. С. 16-26.
11. 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 // *Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал*. 2019. № 5 (371). С. 125-134.
12. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Вернер Н.Н. Системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций // *Актуальные направления науч. исследований XXI века: теория и практика*. 2017. Т. 5. № 5 (31). С. 438-443.
13. Давтян А.Б., Григорьева О.И., Григорьев И.В. Энергетические лесные плантации для эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения в РФ // *Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы*

Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства».

14. Григорьев И.В., Шапиро В.Я., Гулько А.Е. Математическая модель групповой окорки лесоматериалов в окорочных барабанах // *Науч. обозрение*. 2012. № 4. С. 154-171.
15. Газизов А.М., Шапиро В.Я., Григорьев И.В. Анализ современных методик расчета основных параметров окорки режущим инструментом и пути их уточнения // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2008. № 21-3. С. 231-235.
16. Григорьев И.В. Сервисные контракты для современных лесных машин // *Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Пятой Всерос. нац. науч.-практической конф. с междунар. участием (22 мая 2019 г.)*. Петрозаводск, 2019. С. 26-28.
17. Гринько О.И., Григорьева О.И., Григорьев И.В., Григорьев М.Ф., Григорьева А.И. Повышение эффективности тушения лесных пожаров на основе прогнозных моделей их возникновения // *Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы междунар. науч.-практической конф. (9-10 июня 2020 г.)*. Воронеж, 2020. С. 242-246.
18. Григорьев И.В., Григорьева О.И. Правила техники безопасности при тушении лесных пожаров // *Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах*. 2022. № 1. С. 21-33.
19. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Никифорова А.И., Глуховский В.М. Перспективные направления развития технологических процессов лесосечных работ // *Труды БГТУ*. №2. Лесная и деревообрабатывающая пром-сть. 2016. № 2 (184). С. 109-116.
20. Куницкая О.А., Помигуев А.В., Афоничев Д.Н., Григорьев В.И., Дмитриева И.Н., Григорьев Г.В. Альтернативные источники энергии для автономного энергоснабжения удаленных объектов сельского хозяйства и лесного комплекса // *Вестн. Воронежского гос. аграрного ун-та*. 2022. Т. 15. № 1 (72). С. 71-81.

References

1. Tambi A.A., Grigor'ev I.V., Davtyan A.B., Pomiguev A.V., Kalita O.N., Grigor'ev V.I. Technological integration of timber enterprises // *Derevoobrabativalushaya promishlennost' (Woodworking industry)*. 2021. № 1. P. 26-37.
2. Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I. Main directions of ensuring environmental safety of timber production // *Aktual'nye napravleniya nauch. issledovanij XXI veka: teoriya i praktika*. 2015. V. 3. № 2-1 (13-1). P. 202-205.
3. Tambi A.A., Morkovina S.S., Grigor'ev I.V., Grigor'ev V.I. Development of circular economy in Russia: biofuel market // *Forestry Engineering Journal*. 2019. V. 9. № 4 (36). P. 173-185.
4. Grigor'ev V.I. Opportunities of development of import of Russian solid biofuel // *Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: materialy SHestoj Vseros. nac. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem (22 maya 2020 g.)*. Petrozavodsk, 2020. P. 44-45.
5. Grigor'ev V.I. Factors of change in added value in the Russian timber industry // *Sovremennyye problemy i dostizheniya agrarnoy nauki v Arktike: sb. nauch. st. po materialam Vseros. studencheskoj nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem v ramkah «Severnogo foruma - 2020» (29-30 sent. 2020 g.) i Mezhdunar. nauch. onlajn letnej shkoly - 2020 (6-20 iyulya 2020 g.)*. Yakutsk, 2020. P. 276-288.

6. Grigor'ev V.I., Ermakova N.A. Transformation of value added chains in the Russian timber industry // *Innovacionnaya ekonomika*. 2020. № 4 (25). P. 4-19.
7. Grigor'ev V.I., Ermakova N.A. Regional competitiveness and the task of effective use of forest resources of the Far East // *Innovacionnaya ekonomika*. 2021. № 4 (29). P. 53-68.
8. Grigor'ev V.I., Belyaeva N.B. Political and economic aspects of the development of wood biofuel production in Russia // *Innovacionnye processy v nauke i tekhnike XXI veka: materialy XVIII Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. studentov, aspirantov, uchenyh, ped. rabotnikov i specialistov-praktikov (Nizhnevartovsk, 24 apr. 2020 g.)*. Tyumen', 2020. P. 116-119.
9. Grigor'ev I.V. Transportation of timber by rail // *Potencial nauki i obrazovaniya: sovremennye issledovaniya v oblasti agronomii, zemleustrojstva, lesnogo hozyajstva: sb. tr. konf. (20 marta 2019 g.)*. Yakutsk, 2019. P. 5-9.
10. Markov O.B., Voronov R.V., Davtyan A.B., Grigor'ev I.V., Kalita G.A. Mathematical model for choosing a system of machines for creating and operating forest plantations // *Derevoobrabativaushaya promishlennost' (Woodworking industry)*. 2021. № 1. P. 16-26.
11. Voronov R.V., Markov O.B., Grigor'ev I.V., Davtyan A.B. Mathematical model of the modular principle of selecting a system of machines for the creation and operation of forest plantations // *Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal)*. 2019. № 5 (371). P. 125-134.
12. Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I., Verner N.N. Machine systems for the creation and operation of forest plantations // *Aktual'nye napravleniya nauch. issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*. 2017. V. 5. № 5 (31). P. 438-443.
13. Davtyan A.B., Grigor'eva O.I., Grigor'ev I.V. Energetic forest plantations for effective involvement in the turnover of agricultural land in Russia // *Lesnaya inzheneriya, materialovedenie i dizajn: materialy 86-j nauch.-tekhnicheskoy konf. prof.-prepod. sostava, nauch. sotrudnikov i aspirantov (31 yanv. - 12 fevr. 2022 g.)*. Minsk, 2022. P. 42-45.
14. Grigor'ev I.V., SHapiro V.YA., Gul'ko A.E. Mathematical model of group debarking of timber in debarking drums // *Science Review*. 2012. № 4. P. 154-171.
15. Gazizov A.M., SHapiro V.YA., Grigor'ev I.V. Analysis of modern methods of calculation of the basic parameters of debarking by cutting tools and ways of their specification // *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*. 2008. № 21-3. P. 231-235.
16. Grigor'ev I.V. Service contracts for modern forest machines // *Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: materialy Pyatoy Vseros. nac. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem (22 maya 2019 g.)*. Petrozavodsk, 2019. P. 26-28.
17. Grin'ko O.I., Grigor'eva O.I., Grigor'ev I.V., Grigor'ev M.F., Grigor'eva A.I. Improvement of forest fire suppression efficiency based on predictive models of their occurrence // *Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve: materialy mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (9-10 iyunya 2020 g.)*. Voronezh, 2020. P. 242-246.
18. Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I. Safety rules for extinguishing forest fires // *Bezopasnost' i ohrana truda v lesozagotovitel'nom i derevoobrabatvayushchem proizvodstvah*. 2022. № 1. P. 21-33.
19. Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I., Nikiforova A.I., Gluhovskij V.M. Prospective directions in the development of technological processes of timber cutting operations // *Trudy BGTU. №2. Lesnaya i derevoobratvayushchaya prom-st'*. 2016. № 2 (184). P. 109-116.
20. Kunickaya O.A., Pomiguyev A.V., Afonichev D.N., Grigor'ev V.I., Dmitrieva I.N., Grigor'ev G.V. Alternative energy sources for autonomous power supply of remote objects of agriculture and forestry // *Vestnik of Voronezh state agrarian university*. 2022. V. 15. № 1 (72). P. 71-81.