УДК 674.815 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-3-103-107

# Обезвоживание влажной щепы

Б.М. Локштанов[a], В.В. Орлов[b], В.А. Соколова[c], И.В. Бачериков[d], Г.К. Парфенопуло[e], В.В. Неслухов[f]

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, пер. Институтский 5, Санкт-Петербург, Россия
[a]blokshtanov@mail.ru, [b]artictvetal1987@gmail.com, [c]sokolova_vika@inbox.ru, [d]ivashka512@gmail.com, [e]parfenon73@mail.ru, [f] nesluhov9325@yandex.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-5390-1457, [b]https://orcid.org/0000-0001-8556-3555, [c]https://orcid.org/0000-0001-6880-445X, [d]https://orcid.org/0000-0002-0531-1604, [e]https://orcid.org/0000-0002-3701-9536, [f] https://orcid.org/0000-0003-3816-1523
Статья поступила 24.05.2018, принята 30.06.2018

*В статье рассматриваются свойства топливной щепы из лесосечных отходов. Описан процесс удаления свободной влаги из капилляров древесины (щепы) с целью снижения влажности древесины и повышения ее теплотворной способности. Разработана математическая модель обезвоживания щепы в поле центробежных сил при центрифугировании. Приведен расчет производительности промышленной центрифуги, устанавливаемой в системе производства топливной щепы. Также в статье приведены результаты опытов по интенсивности снижения влаги щепы с разными породами древесины. Топливная щепа, заготовленная из лесосечных отходов, имеет определенные физико-механические свойства, характеристики которых оценивают щепу как топливо и позволяют рассчитать экономические показатели применения этой щепы при получении тепловой энергии. Повышение качества свойств щепы также положительно влияет на другие сопутствующие факторы, такие как перевозка и хранение щепы. Экспериментальная установка, описываемая в статье, позволяет исследовать процесс центрифугирования щепы и оценить ее влажность после работы в различных режимах и с разными породами древесины. Как топливо щепу оценивают по ее влажности и теплотворной способности, они взаимосвязаны. Например, если свежесрубленная древесина имеет влажность порядка 80–120 % (абс.), то ее относят к высоковлажным видам топлива, а ее теплотворная способность составляет 1 860 – 2 870 ккал/кг. Снижение влажности древесины до 30 % позволит повысить ее теплотворную способность до 4 000 – 4 500 ккал/кг, т. е. до показателей некоторых углей: бурый уголь — 3 100, каменный уголь — 6 450 ккал/кг.*

**Ключевые слова:** щепа; влажность древесины; обезвоживание; центрифугирование; теплотворная способность.

# Dehydration of wet chips

B.M. Lokshtanov[a], V.V. Orlov[b], V.A. Sokolova[c], I.V. Bacherikov[d], G.K. Parfenopulo[e], V.V. Neslukhov[f]

St. Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov; 5, Institutsky Per., St. Petersburg, Russia
[a]blokshtanov@mail.ru, [b]artictvetal1987@gmail.com, [c]sokolova_vika@inbox.ru, [d]ivashka512@gmail.com, [e]parfenon73@mail.ru, [f] nesluhov9325@yandex.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-5390-1457, [b]https://orcid.org/0000-0001-8556-3555, [c]https://orcid.org/0000-0001-6880-445X, [d]https://orcid.org/0000-0002-0531-1604, [e]https://orcid.org/0000-0002-3701-9536, [f] https://orcid.org/0000-0003-3816-1523
Received 24.05.2018, accepted 30.06.2018

*The article considers the properties of fuel chips from logging wastes. The process of removing free moisture from wood capillaries (chips) in order to reduce the humidity of wood and increase its calorific value is described. A mathematical model of chips dehydration in the field of centrifugal forces during centrifugation has been developed. The calculation of the productivity of an industrial centrifuge installed in a fuel-wood chips production system is given. Also, the article presents the results of experiments on the intensity of moisture reduction in chips with different wood species. Fuel chips harvested from logging residues have certain physical and mechanical properties, the characteristics of which assess chips as fuel and allow to calculate the economic performance of the product in obtaining thermal energy. Improving the quality of the properties of chips also has a positive effect on other attendant factors, such as transport and storage of chips. The experimental setup, described in the article, makes it possible to investigate the process of chips centrifugation and estimate its moisture content after working in different modes and with different types of wood. As fuel chips are evaluated for their moisture and heat-creative capacity, they are interrelated. If freshly chopped wood has a moisture content of about 80 - 120% (abs.), then it is classified as high-moisture fuel, and its calorific value is 1860-2870 kcal / kg. Reducing the humidity of wood to 30% increases its calorific value to the values of 4000 - 4500 kcal / kg, that is, to the indices of some coals: brown coal - 3100, coal - 6450 kcal / kg.*

**Keywords:** wood chips; wood moisture; dehydration; centrifugation; calorific value.

## Введение

Щепа, полученная из свежесрубленной древесины и древесины, побывавшей в сплаве, древесины-топляка и древесины, прошедшей гидролиз и другие обработки водой, имеет повышенную влажность, затрудняющую ее использование в виде топлива или материала для пропитки реагентами. Влажность в древесине может быть связанной внутри волокон или быть свободной, в капиллярах. Снижение влажности щепы возможно многими способами. Сушка при высокой температуре позволяет снизить не только капиллярную, но и связанную влагу, но это экономически затратный способ. Известны механические способы, в частности центрифугирование как наименее затратный, но при этом мы можем удалить только связанную влагу. Для снижения влажности щепы центрифугированием наибольший интерес представляют способы с непрерывным движением материала — щепы как наиболее производительные, с приемлемыми габаритами. Но для щепы этот процесс малоизучен, хотя и представляет большой интерес для лесной отрасли.

**Методика проведения исследования.** Древесина относится к пористому материалу в составе волокон и капилляров, в которых находится влага, причем в волокнах влага связанная, и ее количество обычно составляет ~ 30 % (абс.) от массы древесины, а в капиллярах влага свободная [4]. Обычно влажность свежесрубленной древесины составляет 80–120 % (абс.) или 47–52 % (отн.), т. е. около половины массы составляет жидкость — вода. Древесина хорошо впитывает воду, и ее влажность может достигать 150–170 %. Тогда ее плотность может превысить 1 000 кг/м$^3$, и она тонет — возникает топляк, особенно при сплаве древесины по рекам и озерам [1]. В зависимости от строения, на микроскопическом уровне, породы древесины отличаются, и их делят на три группы: 1 — хвойные (сосна, ель и т. п.), 2 — лиственные кольцесосудистые (дуб, ясень) и 3 — лиственные рассеяннососудистые (береза, осина). Наибольшее промышленное значение в России имеют 1-я и 3-я группы.

Микроскопическое строение хвойных пород состоит в основном из удлиненных прозенхимных клеток, трахеид и коротких паренхимных клеток. Основная функция трахеид — проведение жидкости по стволу дерева. В связи с этим свободная жидкость сосредоточена в трахеидах. Микроскопическое строение древесины лиственных пород более сложное, чем хвойных. Они имеют три вида тканей: водопроводящую, состоящую из сосудов и трахеид; механическую, состоящую из волокон, либриформа и волокнистых трахеид; заносящую из паренхимных клеток сердцевинных и вертикальной паренхимы.

Следует отметить, что у хвойных пород трахеиды имеют меньшее поперечное сечение, чем у хвойных. В связи с этим влага из хвойных пород выходит медленнее, чем из лиственных. Хвойные породы дольше насыщаются влагой, например при сплаве.

Для эффективного использования древесины необходимо удалить влагу: требуются сухие бревна при строительстве, сухие древесные материалы как топливо, сухие доски в деревообработке и т. д.

Известно много способов обезвоживания древесины: термический (естественный или искусственный), механический, комбинированные. Механические способы обезвоживания включают пневматический, вибрационный, центробежный, электрокинетический, вибрационно-конвективный, конвективно-центробежный (ротационный), центробежно-высокочастотный и т. д. [5], но наиболее простой и менее затратный — это способ центрифугирования в поле центробежных сил, который мы предлагаем для удаления влаги из топливной щепы, нарубленной из лесосечных отходов, низкокачественной древесины, топляка и других древесных материалов, имеющих повышенную влажность. Центрифугирование производим на центрифуге диаметром 600 мм с меняющейся скоростью вращения барабана, обеспечивающей факторы разделения $F_r$ = 350G; 700G; 1050G. Щепа была нарублена из двух пород древесины, ели и березы, имеющих начальную влажность 120, 100, 80, 60 %. Кроме того, был изучен вопрос снижения влажности топливной щепы на перевозку щепы щеповозами.

Таким образом, основной задачей исследования является определение времени центрифугирования для удаления свободной влаги из щепы при различных факторах разделения и различных показателях начальной влажности.

*Целью настоящих исследований* является разработка технологии и техники для снижения влажности щепы с 120 до 35–40 % при высокой производительности механических установок, позволяющих без нарушения целостности щепы получать эффективное топливо.

Древесина — горючий материал, и ее теплотворная способность зависит от влажности. Так, 1 кг влажной древесины содержит горючее древесное вещество (чистое) в количестве, равном 1 кг минус масса влаги. Только в 1 кг абсолютно сухой древесины будет содержаться 1 кг чистого древесного топлива.

Чем выше влажность древесины (щепы), тем ниже ее теплотворная способность. Так, при влажности 120 % (абс.) теплотворная способность сосны составляет 2 200 ккал/кг, березы — 2 400 ккал/кг. Если снизить влажность этих пород до 60 %, то теплотворная способность составит у сосны 3 500 ккал/кг, у березы — 3 800 ккал/кг. Если у этих пород удалить свободную влагу и довести влажность до 30–40 %, то теплотворная способность поднимется до 4 200 ккал/кг у сосны и 4 500 ккал/кг у березы. Это хорошие показатели древесины (щепы) как топлива, и они приближаются к показателям бурых углей. Рассмотрена математическая модель удаления влаги из древесины (щепы). Исходя из теории центрифугирования разделяющихся материалов, можно отметить важную характеристику — фактор разделения $F_r$:

$$F_r = \frac{\omega_б^2 R_{PT}}{g}, \qquad (1)$$

где $R_{PT}$ — максимальный внутренний радиус ротора (барабана центрифуги), *м*; $\omega_б$ — угловая скорость вращения центрифуги, $c^{-1}$; $g$ — ускорение свободного падения $g$ = 9,85 *м*/$c^2$.

Жидкость, находящаяся в капиллярах древесины (щепы), вытекает из них под действием центробежной силы, возникающей при вращения барабана центрифуги:

$$\overline{F} = m\omega_б^2 \overline{r} \ , \qquad (2)$$

где $m$ — масса отсека жидкости в капилляре, *кг*; $r$ — радиус капилляра, *м*.

Для описания процесса удаления свободной влаги из капилляра используем уравнение динамики тела с переменной массой [3]:

$$F = \frac{d(mv)}{dt} = m\frac{dv}{dt} + v\frac{dm}{dt}, \ \text{Н}, \qquad 3)$$

где $F$ — сумма сил, действующих на отсек жидкости в капилляре, *Н*; $m$ — масса отсека жидкости в капилляре, *кг*; $v$ — скорость движения жидкости в капилляре вдоль его оси, *м/с*; $t$ — время удаления жидкости из капилляра, *с*.

Масса влаги в капилляре будет:

$$m = \rho_Ж r^2 \pi \cdot (R - l) \ , \qquad (4)$$

где $\rho_Ж$ — плотность жидкости, находящейся в капилляре, *кг/м*$^3$; $R$ — расстояние от оси вращения центрифуги до капилляра (до торца капилляра), *м*; $l$ — расстояние от оси вращения капилляра (от оси вращения центрифуги) до ближайшего к оси центра мениска жидкости в капилляре, *м*; $r$ — радиус капилляра, *м*.

Скорость движения жидкости в капилляре при центрифугировании имеет вид:

$$v = \frac{d(R-l)}{dt} = -\frac{dl}{dt}, \ м/с \qquad .(5)$$

Время $t$, в течение которого из капилляра будет удаляться жидкость под действием центробежных сил, можно подсчитать по формуле (6):

$$t = \frac{16\mu}{\rho_Ж r^2 \omega^2 \cos^2\alpha} \ln\left( \frac{\sqrt{R^2 - \frac{\rho_Ж r^2 \omega^2 \cos^2\alpha}{16\mu}} + R}{2R - l_0} \right) \qquad (6)$$

где μ — динамический коэффициент вязкости.

$\alpha$ — угол наклона капилляра $-\frac{\pi}{2}$ до $+\frac{\pi}{2}$.

Из формулы (6) видно, что время удаления жидкости из капилляра при центрифугировании, зависит от размеров центрифуги, скорости вращения барабана и свойств древесины (щепы), например, от ее размеров, начальной влажности, породы древесины.

Рассмотрев единичный капилляр, можно перейти к расчетам по удалению свободной влаги из щепы, находящейся в центрифуге.

Количество жидкости $dQ$, удаляемой из древесины (щепы) за единицу времени, можно подсчитать по уравнению (7):

$$dQ = \frac{dl}{dt}\omega_Ф \ , \qquad (7)$$

где $\omega_Ф$ — площадь фильтрации с каждого 1 мм$^2$, *мм*$^2$.

Величина $\omega_Ф$ у цельной древесины различных пород разная. Так, у березы $\omega_Ф$ = 0,259 мм$^2$, а для сосны $\omega_Ф$ = 0,495 мм$^2$. Эти величины указывают, что у сосны радиус капилляра значительно меньше, чем у березы, а сопротивление жидкости к удалению в 1,5–2,5 раза выше.

Центрифугирование щепы можно осуществлять в центрифугах различной конструкции барабана: горизонтальной, наклонной, вертикальной, с конусной стенкой барабана, с принудительной выгрузкой и т. д. Но чем сложнее конструкция центрифуги, тем труднее ее эксплуатировать, особенно при необходимости обезвоживания больших объемов древесных отходов, в том числе лесосечных отходов, щепы из низкокачественной древесины и топляка и т. д. Для исследования процесса центрифугирования щепы была создана установка с вертикальным барабаном центрифуги (рис. 1). За счет небольшой конусности барабана щепа по мере обезвоживания под действием центробежных сил поднималась вверх и выходила из центрифуги подсушенной (рис. 1) [12].

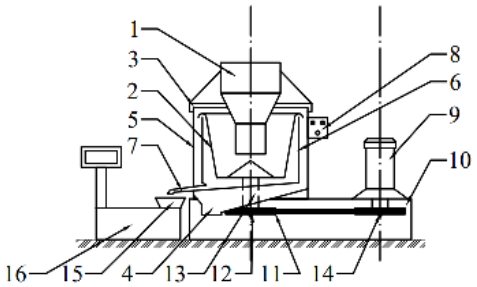



**Рис. 1.** Экспериментальная центрифуга для обезвоживания щепы

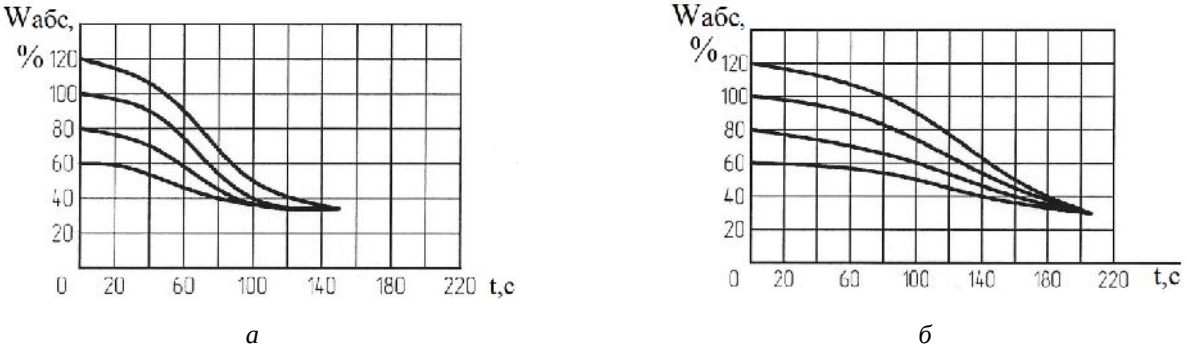
С помощью подвижного загрузочного устройства *1* можно регулировать количество загружаемой щепы в барабан *2*, т. е. величину слоя щепы, находящегося на внутренней поверхности барабана.

Благодаря некоторой конусности барабана (угол конусности 1–2°) обеспечиваются движение слоя щепы (вверх) и выход обезвоженной щепы из барабана в пространство между корпусом центрифуги *5* и отбойником жидкости *6*. Сухая щепа выходит из установки через выпуск *4*. Удаляемая жидкость через перфорацию барабана сливается через выпуск *7* в чашку *15* электронных весов *16*. С пульта управления *8* ведется включение двигателя *9* и установка режима его работы. Через съемные шкивы *12*, *14* и вал *13* производят изменения скорости вращения центрифуги для обеспечения факторов разделения $F_г$ = 350G; 700G; 1050G.

Основные результаты исследований приведены на рис. 2–4.

При проведении экспериментов выявлено, что процесс обезвоживания щепы зависит от породы древесины. Время удаления свободной влаги из березы (рис. 2 *а*) почти в 1,5 раза меньше, чем у сосны (рис. 2 *б*). При увеличении фактора разделения (рис. 4) интенсивность удаления свободной влаги из березовой и сосновой щепы увеличивается (рис. 3, 4).

Полученная щепа со сниженной до 35–40 % влажностью обладает повышенной теплотворной способностью: для березы — 4 500 ккал/кг, для сосны — 4 000 ккал/кг.




*а* *б*

**Рис. 2.** Интенсивность снижения влажности щепы при факторе разделения F = 1050G: *а* — березовая щепа; *б* — сосновая щепа

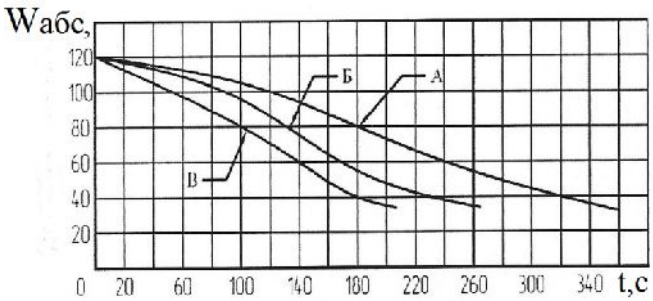



**Рис. 3.** Интенсивность обезвоживания сосновой щепы при первоначальной влажности 120 % при различных факторах разделения F: А — 350G; Б — 700G; В — 1050G

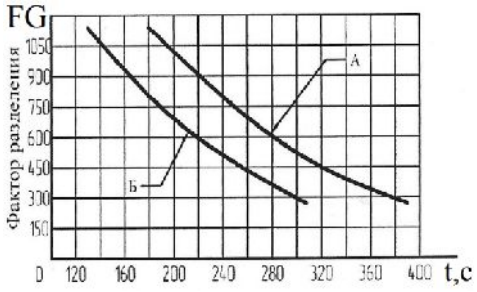



**Рис. 4.** Продолжительность удаления свободной влаги из щепы влажностью 120 % при различных факторах разделения: А — сосна; Б — береза

Опыты по центрифугированию щепы показали, что этот способ [11] позволяет обезвоживать щепу до влажности 30–40 % (абс.), т. е. удаляется почти вся свободная влага. При этом теплотворная способность единицы массы щепы увеличивается с 2 000 – 2 500 ккал/кг (при влажности 80–120 %) до 4 000 – 4 500 ккал/кг (при влажности 30–40 %) [2], что позволяет эффективнее использовать такую щепу в качестве топлива. При производстве топливных гранул и брикетов из измельченных древесных отходов (щепа, опилки) одной из главных составляющих процесса является обезвоживание материала до 8–10 %. Если древесные отходы влажные (120–150 %), а это характерно для свежесрубленной и сплавной древесины, то на удаление основной влаги затрачивается большое количество тепла. Предлагается эти отходы обезвоживать в две стадии: механическим способом, на центрифуге, до влажности 30–40 %, и до влажности 8–10 % — термическим способом, в сушильных барабанах и т. п. Двухстадийная сушка измельченных древесных отходов позволит на 25–30 % сократить расход теплоносителя.

Промышленную центрифугу производительностью ~ 16 пл. м$^3$/ч можно устанавливать вместе с мобильной рубительной машиной для производства топливной щепы из лесосечных отходов [6]. Мощность такой установки порядка 150 кВт, причем для центрифуги диаметром 1,5 м с фактором разделения 1050G потребуется 40 кВт. Увеличение фактора разделения приводит к значительному росту мощности и экономически нерентабельно. По расчетам, при первоначальной влажности щепы порядка 80–110 % (абс.) за один час можно удалить около 2 000 кг жидкости. Следует отметить, что перевозка обезвоженной щепы после центрифугирования дает ~ 20 % экономии расходов на перевозку. Перспективным является использование центрифугирования при обработке щепы, имеющей повышенную влажность, например при рубке топляка, щепы после гидротранспорта, опилок при производстве пеллет и брикетов и т. д.

**Выводы**

1. На основе математической модели удаления свободной влаги из капилляров древесины (щепы) установлено, что свободную влагу возможно удалять центрифугированием. Эффективность удаления влаги пропорциональна фактору разделения.

2. Создание промышленной центрифуги должно базироваться на установке непрерывного действия, обеспечивающей высокую производительность по щепе влажностью 35–40 %.

3. Расчеты промышленных центрифуг необходимо проводить по хвойной щепе.

*Литература*

1. Патякин В.И. Проблема повышения плавучести круглых лесоматериалов. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 264 с.

2. Орлов В.В., Бачериков И.В. Снижение влажности щепы из лесосечных отходов // Леса России в XXI веке: материалы

девятой междунар. науч.–технической интернет–конф. СПб., 2012. С. 87–89.

3. Фихтенгольц Г. М. Основы математического анализа. М.: Наука, 1968. Т.1. 440 с.

4. Перелыгин Л.М., Уголев Б.Н. Древесиноведение. 3-е изд., перераб. М.: ГОСЛЕЗБУМИЗДАТ, 1963. 282 с.

5. Соколова В.А. Результаты экспериментальных исследований влияния эффекта биполярности обезвоживания на интенсивность и качество сквозной пропитки // Вестн. КрасГАУ. 2010. № 2 (41). С. 133-135.

6. Орлов В.В., Локштанов Б.М., Пейович Д.Д. Новые технологии производства энергетической щепы // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы Междунар. науч.-технической конф. Вологда, 2016. С.133-134.

7. Пейович Д.Д., Локштанов Б.М. Подготовка древесного сырья для производства пеллет // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы Междунар. науч.-технической конф. Вологда, 2017. С. 120-123.

8. Бачериков И.В., Локштанов Б.М., Козаченко А.В., Суворова Н.А., Орлов В.В. Способы очистки энергетической щепы от посторонних включений // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы Междунар. науч.-технической конф. Вологда, 2016. С. 110-112.

9. Локштанов Б.М., Орлов В.В., Бачериков И.В. Обезвоживание топливной щепы центрифугированием.- Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы Междунар. науч.-технической конф. Вологда, 2015. С. 108-114.

10. Локштанов Б.М., Орлов В.В., Бачериков И.В. Математическая модель процесса обезвоживания щепы центрифугированием // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. СПб., 2014. Вып. 29. С. 185-197.

11. Патякин В.И., Локштанов Б.М., Орлов В.В. Способ переработки топливной щепы из лесосечных отходов в условиях лесосеки: пат. на изобретение 2537529 Рос. Федерация. № 2013102131; заявл. 18.01.13; опубл. 10.01.15, Бюл. № 1.

12. Локштанов Б.М., Бачериков И.В., Суворова Н.А., Костюков И.И., Орлов В.В. Устройство для изготовления топливной щепы из лесосечных отходов:пат. на полезную модель 141391 Рос. Федерация. № 2013148655; заявл. 01.11.13;опубл.10.06.14, Бюл. № 16.

*References*

1. Patyakin V.I. The problem of increasing buoyancy of round timber. M.: Lesn. prom-st’, 1976. 264 p.

2. Orlov V.V., Bacherikov I.V. Decrease in the moisture content of wood chips from logging wastes // Lesa Rossii v XXI veke: materialy devyatoj mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoj internet-konf. SPb., 2012. P. 87-89.

3. Fihtengol’c G.M. Fundamentals of Mathematical Analysis. M.: Nauka, 1968. T.1. 440 p.

4. Perelygin L.M., Ugolev B.N. Wood Science with the Basics of Forest Commodity Science. 3-e izd., pererab. M.: GOSLEZBUMIZDAT, 1963. 282 p.

5. Sokolova V.A. The results of experimental studies of the effect of bipolarity of dehydration on the intensity and quality of end-to-end impregnation // The Bulletin of KrasGAU. 2010. № 2 (41). P. 133-135.

6. Orlov V.V., Lokshtanov B.M., Pejovich D.D. New technologies for the production of energy chips // Aktual’nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoj konf. Vologda, 2016. P.133-134.

7. Pejovich D.D., Lokshtanov B.M. Preparation of wood raw materials for the production of pellets // Aktual’nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoj konf. Vologda, 2017. P. 120-123.

8. Bacherikov I.V., Lokshtanov B.M., Kozachenko A.V., Suvorova N.A., Orlov V.V. Methods for cleaning energy chips from foreign inclusions // Aktual’nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoj konf. Vologda, 2016. P. 110-112.

9. Lokshtanov B.M., Orlov V.V., Bacherikov I.V. Dehydration of fuel chips by centrifugation// Aktual’nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoj konf. Vologda, 2015. P. 108-114.

10. Lokshtanov B.M., Orlov V.V., Bacherikov I.V. Mathematical model of the process of dehydration of wood chips by centrifugation // Izvestia SPbLTA, 2014. Vyp. 29. P. 185-197.

11. Patyakin V.I., Lokshtanov B.M., Orlov V.V. Method of processing of fuel chips from cutting waste in a cutting area: pat. na izobretenie 2537529 Ros. Federaciya. № 2013102131; zayavl. 18.01.13; opubl. 10.01.15, Byul. № 1.

12. Lokshtanov B.M., Bacherikov I.V., Suvorova N.A., Kostyukov I.I., Orlov V.V. Apparatus for the production of fuel chips from logging residues: pat. na poleznuyu model’ 141391 Ros. Federaciya. № 2013148655; zayavl. 01.11.13; opubl.10.06.14, Byul. № 16.