

УДК 620.95:662.638

А. Савельев¹, С. Е. Арико², П. А. Протас², Я. Петерсонс³, А. Зимелис⁴¹Латвийский сельскохозяйственный университет²Белорусский государственный технологический университет³ГАО «Латвийские государственные леса»⁴Латвийский государственный лесохозяйственный исследовательский институт «Силава»**СТРУКТУРНЫЙ БАЛАНС ЛЕСНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ
ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ БЕЛАРУСИ И ЛАТВИИ**

Развитие энергетики Беларуси и Латвии направлено на увеличение объемов использования местных видов энергоресурсов, в первую очередь возобновляемых. Это обусловило повсеместное строительство мини-ТЭЦ и котельных на биомассе, основным сырьем для которых является топливная щепа, полученная из дровяной древесины и отходов деревообработки. При этом потенциальным дополнительным сырьем в топливно-энергетическом балансе является щепа из отходов лесозаготовок, пней древесины и тонкомерных деревьев, заготавливаемых при очистке и содержании лесных дорог. Вовлечение в производство данного сырья будет также способствовать повышению эффективности лесовосстановления и работ по содержанию лесной инфраструктуры. Различные показатели теплотворной способности данных видов сырья для эффективной работы энергетических установок обуславливают необходимость определения рационального состава древесного сырья для производства топливной щепы. Разработанная методика оценки структурного баланса лесных энергоресурсов позволяет рассчитать теплотворную способность топливной щепы из различных компонентов древесного сырья и определить необходимый объем древесного энергетического сырья для соответствующих энергетических установок. Данная методика также позволяет при известном объеме и установленных характеристиках сырья для энергетической установки определить рациональный структурный баланс древесного сырья для получения топливной щепы.

Ключевые слова: лесные ресурсы, древесное топливо, структурный баланс, щепа, котельная установка, методика.

A. Saveljev¹, S. Ye. Ariko², P. A. Protas², J. Petersons³, A. Zimelis⁴¹Latvia University of Agriculture²Belarusian State Technological University³Joint Stock Company “Latvia’s State Forest”⁴Latvian State Forest Research Institute “Silava”**STRUCTURAL BALANCE OF FOREST ENERGY RESOURCES
FOR ENERGY OF BELARUS AND LATVIA**

The development of the energy sector of Belarus and Latvia is aimed at increasing the use of local types of energy resources, primarily renewable ones. This led to the ubiquitous construction of mini-TPP (thermal power plant) and biomass boiler houses, the main raw material for which is fuel chips obtained from firewood and wood waste. At the same time, potential additional raw materials in the fuel and energy balance are chips from logging waste, wood and small-sized trees harvested during the cleaning and maintenance of forest roads. The involvement in the production of this raw material will also contribute to the improvement of the efficiency of reforestation and the maintenance of forest infrastructure. Given the various indicators of the calorific value of these types of raw materials for the efficient operation of power plants, it is necessary to determine the rational composition of wood raw materials for the production of fuel chips. The developed methodology for assessing the structural balance of forest energy resources makes it possible to calculate the calorific value of fuel chips from various components of raw wood and determine the required volume of wood energy raw materials for the respective power plants. With a known volume and established characteristics of the raw materials for the power plant, this method also allows determining the rational structural balance of the wood raw material for producing fuel chips.

Key words: forest resources, wood fuel, structural balance, chips, boiler plant, methods.

Введение. Беларусь, как и Латвия, в значительной степени зависит от импорта энергоносителей, преимущественно нефти и природного газа, для производства тепловой и электриче-

ской энергии [1]. Это обстоятельство, а также существенные цены на импортируемый природный газ обуславливают необходимость развития использования местных энергоресурсов.

Правительствами Республики Беларусь и Республики Латвия устанавливаются цели по увеличению использования местных, в том числе возобновляемых источников энергии [2, 3].

В связи с тем, что Беларусь и Латвия имеют лесистость соответственно около 40 и более 50% [4, 5], долю лесного сектора в структуре ВВП около 2 и 6% [6] и являются одними из богатейших стран в Европе по запасу древесины на душу населения, в последнее время большое внимание уделяется использованию древесных видов топливных ресурсов [7–9]. Анализ методов подготовки и применения древесных видов топлива, используемых при этом технологий сжигания, котельного оборудования, систем контроля и управления производственным процессом свидетельствует о том, что при производстве тепловой и электрической энергии путем сжигания древесного биотоплива первоочередное внимание необходимо уделять производству и потреблению топливной щепы [10]. Накопленный опыт и практика показывают, что потребление древесных энергоресурсов в виде топливной щепы обеспечивает наиболее эффективное их использование как с технической, так и экономической точек зрения.

Известно, что древесное сырье для энергетических нужд является возобновляемым сырьем и оказывает положительный баланс с точки зрения сокращения выбросов парниковых газов в атмосферу. Республика Беларусь ежегодно производит около 1,8 млн м³ топливной щепы [4] с собственным ее потреблением на местных котельных и мини-ТЭЦ около 1,6 млн м³. Основным сырьем для производства топливной щепы являются дровяная древесина и отходы деревообработки.

В Латвии ежегодный объем заготовки древесного сырья для энергетических нужд составил около 1,5 млн м³, при этом 0,5 млн м³ заготавливается на рубках главного пользования только в государственных лесах.

Источниками древесного сырья для энергетических нужд являются: лесной фонд; отходы производств пиломатериалов, плит и целлюлозы; вторично использованная древесина. Соответственно, древесное топливо, произведенное из различного сырья, отличается по своим характеристикам. Чтобы работа котельных агрегатов и когенерационных установок была эффективной, предъявляются определенные требования к древесному топливу. Поэтому необходимо определить оптимальный вид топлива в сфере планирования объемов заготовки древесного сырья для энергетических нужд.

Известны различные методы оценки общего потенциала древесного энергетического сырья в лесном фонде. Однако не решен вопрос, в ка-

кой ежегодной пропорции необходимо заготавливать сырье различных видов для производства топливной щепы: порубочные остатки, нетоварная древесина, пневая древесина.

Целью работы является определение рационального сочетания древесного энергетического сырья в топливе котлоагрегатов, работающих в оптимальном режиме.

Основная часть. Наиболее важным источником древесного сырья для получения топливной щепы является лесной фонд, при освоении которого кроме дровяной древесины образуются различные виды древесных отходов:

- порубочные остатки лесозаготовок;
- нетоварная древесина после очистки трасс и дорожной инфраструктуры;
- пневая древесина.

Каждый из этих видов древесного сырья имеет свою теплотворную способность (табл. 1).

Таблица 1

Теплотворная способность древесного сырья

Вид древесного сырья	Теплотворная способность, МДж/кг
Щепа из лесосечных отходов	17,26
Щепа из тонкомерных деревьев	18,93
Щепа из пнево-корневой древесины	20,44

Котлоагрегаты различных тепловых и когенерационных станций, работающие на топливной щепе из приведенного древесного сырья, имеют оптимальные требования при эксплуатации, в общем виде включающие: скорость потока пара 25 кг/с; температуру пара 527°C; давление пара 119 бар; температуру горения топлива 850–1000°C; минимально допустимую нагрузку 35% мощности.

На основании эксплуатационных требований котлоагрегатов и полученного сочетания видов сырья в древесном энергетическом топливе можно планировать объем заготовки этого сырья с учетом административных регионов (наличия лесфонда и его характеристик, объемов заготовки, расположения энергообъектов и их мощности и др.).

Методика работы. Зная мощность энергетических установок, можно определить, какое количество древесного сырья покроеет потребность теплоустановки за час работы:

$$M = \frac{\sum N}{t}, \quad (1)$$

где M – объем потребленного древесного энергетического сырья, кг/с; $\sum N$ – суммарная мощность тепловой и когенерационной установки, работающей на древесном топливе, МВт;

t – рабочая теплотворная способность древесного сырья, МДж/кг.

Объем сырья в плотных метрах кубических в час определяется с учетом переводного коэффициента насыпной плотности (для щепы из лесосечных отходов 250–400 кг/м³; в среднем 320 кг/м³).

Однако при оценке ресурсов древесного топлива необходимо учитывать, что в ряде административных районов республик объемы производства топливной щепы из лесосечных отходов, которые планируется получать при заготовке деловых лесоматериалов, не достаточны для полного покрытия всей суммарной мощности котлоагрегатов на данных территориях. Соответственно, необходимо обоснование требуемого количества заготавливаемого древесного сырья в виде нетоварной древесины при содержании лесной инфраструктуры и пневой древесины после лесозаготовки. Кроме того, учитывая большой диапазон значений в насыпной плотности и теплотворной способности щепы, получаемой из различных видов древесного сырья, необходимо определять рациональное сочетание этих видов сырья в структуре производства щепы. Схематически данную задачу можно отобразить в виде блок-схемы (рисунок).

Для расчета теплового баланса по разработанной методике следует учитывать, что теплотворный баланс будет состоять из двух частей:

- тепловая мощность котлоагрегата, с коррекцией КПД (тепловые потери на выброс газов, несгоревшее топливо, на собственный обогрев);
- деловая тепловая мощность на производство пара нужных температуры и давления для поддержания температуры потребляемого теплоносителя (воды).

Тепловой баланс выражается формулой

$$B_p Q \eta = D_t (t_t - t_u), \quad (2)$$

где B_p – потребление топлива в единицу времени, кг/час; Q – теплоотдача топлива, МДж/кг; η – коэффициент полезного действия; D_t – потребление теплоносителя, кг/час; $(t_t - t_u)$ – необходимая мощность тепловой энергии, чтобы

теплоноситель довести до нужных давления и температуры, МДж/кг.

С использованием в формуле (3) постоянной числа Больцмана определяется связь между температурой и энергией:

$$\frac{q \phi B_p V_c}{\sigma_0 \phi_{cp} F_{ct} t_0} = B_0, \quad (3)$$

где q – потеря теплоты самим котлоагрегатом; ϕ – коэффициент сохранения теплоты, $\phi = 1$; B_p – расчетный расход топлива, кг/ч; V_c – средняя суммарная теплоемкость продукта горения, 1 кг в интервале температур; σ_0 – коэффициент излучения черного тела, $5,67 \cdot 10^{-11}$ кВт/м²; ϕ_{cp} – тепловая эффективность экранов; F_{ct} – площадь поверхности стенок топки, м²; t_0 – температура горения топлива в топке, 950°С; B_0 – постоянная числа Больцмана, $1,38 \cdot 10^{23}$.

Из этой формулы можно вычислить расход топлива по формуле (4):

$$B_p = \frac{B_0 \sigma_0 \phi_{cp} F_{ct} t_0}{q \phi V_c}. \quad (4)$$

В случае расчета объема *древесного топлива на основании его энергетического содержания* определяется теплотворная способность древесного топлива по формуле

$$Q_n^p = Q_n^{cux} \frac{(100 - W^p)}{100} - 0,02443 W^p, \quad (5)$$

где Q_n^p – низшая теплота сгорания древесного топлива с влажностью W^p , %, и известным компонентным составом, МДж/кг; Q_n^{cux} – низшая теплота сгорания абсолютно сухого древесного топлива с известным компонентным составом, МДж/кг. Определяется по методике, изложенной в EN 14918, EN ISO 18125, EN ISO 17225-1, ISO 1928, ГОСТ 147-2013; 0,02443 – коэффициент, который рассчитывается исходя из теплоты испарения воды, 2,443 МДж/кг для температуры 25°С (МДж/кг на 1% массы влаги).

Для определения низшей теплоты сгорания древесного топлива необходимы следующие исходные данные:

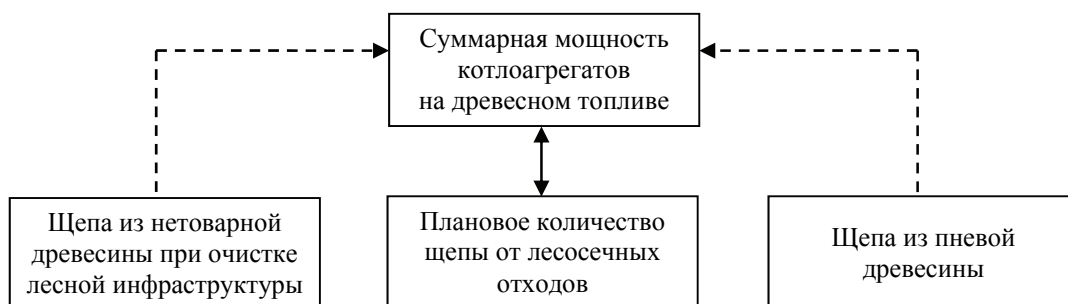


Схема использования топливной щепы различного происхождения

– компонентный состав топлива с указанием удельной доли наличия в процентах породы и частей дерева, например: сосна (древесина ствола без коры) – 30%; сосна (кора) – 10%; сосна (хвоя) – 5%; ель (стволовая древесина, тонкомер) – 35%; осина (стволовая древесина, тонкомер) – 20%. Итого 100%;

– относительная влажность W^p , %, например 48%;

– наличие минеральных (негорючих) примесей A^p , % по весу, например 2%.

Расчет величины низшей теплоты сгорания натурального топлива может производиться на основе известных данных по значениям низшей теплоты сгорания сухих древесных веществ различных пород [11, 12].

Низшую теплоту сгорания абсолютно сухого древесного топлива с известным компонентным составом $Q_n^{сух}$, МДж/кг, находят по формуле

$$Q_n^{сух} = \frac{Q_{n1}^{сух} \cdot P_1 + Q_{n2}^{сух} \cdot P_2 + \dots + Q_{nn}^{сух} \cdot P_n}{100}, \quad (6)$$

где $Q_{n1}^{сух}$, $Q_{n2}^{сух}$, ..., $Q_{nn}^{сух}$ – соответствующие величины низшей теплоты сгорания сухих древесных веществ компонентов анализируемого топлива, МДж/кг; P_1 , P_2 , ..., P_n – соответствующий процентный состав компонентов топлива, %. Значения величин $Q_{n1}^{сух}$, $Q_{n2}^{сух}$, ..., $Q_{nn}^{сух}$ для каждого из компонентов топливной массы P_1 , P_2 , ..., P_n могут приниматься по данным табл. 2 [12].

Таблица 2

Показатели теплотворной способности в абсолютно сухом состоянии для незагрязненного материала

Вид сырья	$Q_n^{сух}$, МДж/кг
Естественный древесный материал (хвойная древесина), без коры, листьев и хвои	19,1
Естественный древесный материал (лиственная древесина), без коры, листьев и хвои	18,9
Естественный материал с корой (хвойная древесина)	19,2
Естественный материал с корой (лиственная древесина)	19,0
Лесосечные отходы (хвойная древесина)	19,2
Лесосечные отходы (лиственная древесина)	18,7

Влияние количества минеральных негорючих примесей в топливе (зольности топлива) на его теплотворную способность может быть

учтено внесением поправки в формулу (5), как показано ниже:

$$Q_n^p = Q_n^{сух} \frac{100 - (W^p + A^p)}{100} - 0,02443W^p, \quad (7)$$

где A^p – содержание минеральных примесей (содержание золы в расчете на рабочую массу) в топливе, %.

Зная теплотворную способность используемого древесного топлива (топливной щепы) с учетом его компонентов, а также суммарную мощность тепловой и когенерационной установки, работающей на древесном топливе, можно по формулам (1) и (2) получить необходимый объем потребленного древесного энергетического сырья и структурный баланс древесного сырья для получения топливной щепы.

Закключение. Учитывая возрастающую роль в энергетике Беларуси и Латвии использования возобновляемых источников энергии и, в первую очередь, древесного топлива, актуальной задачей является вовлечение в сферу производства топливной щепы различного древесного сырья: дровяной и тонкомерной древесины, лесосечных отходов, пней. Анализ характеристик топливной щепы, получаемой из различного древесного сырья, показал, что для эффективной работы энергетических установок необходимо определить рациональный структурный баланс лесных древесных ресурсов для производства щепы. Разработанная методика определения рационального сочетания древесного энергетического сырья при производстве топливной щепы для котлоагрегатов, работающих в оптимальном режиме, позволяет рассчитать теплотворную способность топливной щепы с учетом компонентов древесного сырья для ее производства и определить необходимый объем древесного энергетического сырья. Данная методика также позволяет решать обратную задачу: при известном объеме и установленных характеристиках сырья для энергетической установки определить рациональный структурный баланс древесного сырья для получения топливной щепы.

Использование предлагаемого подхода при организации производства топливной щепы позволит улучшить качество древесного топлива путем обеспечения рациональной структуры древесного сырья в производстве топливной щепы, а также повысить эффективность процессов получения тепловой и электрической энергии на энергообъектах.

Литература

1. Ледницкий А. В. Экономическая эффективность выработки тепловой и электрической энергии при сжигании древесного топлива // Труды БГТУ. 2016. № 7: Экономика и управление. С. 82–86.

2. Sustainable Development Strategy of Latvia until 2030. URL: http://www.pkc.gov.lv/sites/default/files/inline-files/LIAS_2030_en_1.pdf (дата обращения: 10.02.2019).

3. Об утверждении концепции энергетической безопасности Республики Беларусь: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 23 дек. 2015 г., № 1084 // Нац. правовой интернет-портал Респ. Беларусь. 2016. 5/41477.

4. Демьяник Л. Ю., Шут В. П., Худицкая М. А. Современное состояние лесопромышленного производства в организациях министерства лесного хозяйства Республики Беларусь // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–28 апр. 2017 г. / Белорус. гос. технол. ун-т. Минск, 2017. С. 15–19.

5. Eco-innovation in Cyprus. EIO Country Profile 2014–2015. URL: https://ec.europa.eu/environment/ecoap/sites/ecoap_stayconnected/files/field/field-country-files/cyprus_eco-innovation_2015.pdf (дата обращения: 03.02.2019).

6. State of Europe's forests. URL: <https://www.foresteurope.org/docs/fullsoef2015.pdf> (дата обращения: 03.02.2019).

7. Войтов И. В., Ледницкий А. В. Современное состояние и перспективы использования древесного топлива в Республике Беларусь // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–28 апр. 2017 г. / Белорус. гос. технол. ун-т. Минск, 2017. С. 9–14.

8. Fortum Biomasas kogenerācijas stacija Jelgava. URL: <https://www.fortum.lv/par-fortum/kontakti/fortum-biomasas-kogenerācijas-stacija-jelgava> (дата обращения: 07.02.2019).

9. Biomasas izmantosanas ilgtspējības kriteriju pielietosana un pasakumu izstrade. URL: https://www.lvafa.gov.lv/faili/petijumi/Biomasas_izmantosana.pdf (дата обращения: 09.02.2019).

10. Федоренчик А. С., Ледницкий А. В. Энергетическое использование низкокачественной древесины и древесных отходов. Минск: БГТУ, 2010. 446 с.

11. Alakangas E. Properties of wood fuels used in Finland. Technical Research Centre of Finland, VTT Processes, Project report PRO2/P2030/05 (Project C5SU00800). Jyväskylä, 2005. 90 p.

12. Solid biofuels – Fuel specifications and classes: EN ISO 17225-1:2014. Part 1: General requirements. Stockholm: ISO, 2014. 66 p.

References

1. Lednitskiy A.V. Economic efficiency of heat and power generation when burning wood fuel. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 7: Economics and Management, pp. 82–86 (In Russian).

2. Sustainable Development Strategy of Latvia until 2030. Available at: http://www.pkc.gov.lv/sites/default/files/inline-files/LIAS_2030_en_1.pdf (accessed 10.02.2019).

3. On approval of the concept of energy security of the Republic of Belarus: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, 23.12.2015, no. 1084. *Natsional'nyy pravovoy internet-portal Respubliki Belarus* [National legal Internet portal of the Republic of Belarus], 01/01/2016, 5/41477.

4. Dem'yanik L. Yu., Shut V. P., Khuditskaya M. A. Current condition of forest industrial production in the organizations of the Ministry of Forestry the Republic of Belarus. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Lesozagotovitel'noye proizvodstvo: problemy i resheniya"* [Materials of the International scientific and technical conference "Logging production: problems and solutions"]. Minsk, 2017, pp. 15–19 (In Russian).

5. Eco-innovation in Cyprus: EIO Country Profile 2014–2015. Available at: https://ec.europa.eu/environment/ecoap/sites/ecoap_stayconnected/files/field/field-country-files/cyprus_eco-innovation_2015.pdf (accessed 03.02.2019).

6. State of Europe's forests. Available at: <https://www.foresteurope.org/docs/fullsoef2015.pdf> (accessed 03.02.2019).

7. Voitau I. V., Lednitskiy A. V. Current and prospective uses of wood fuel in the Republic of Belarus. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Lesozagotovitel'noye proizvodstvo: problemy i resheniya"* [Materials of the International scientific and technical conference "Logging production: problems and solutions"]. Minsk, 2017, pp. 9–14 (In Russian).

8. Fortum Biomasas kogenerācijas stacija Jelgava [Fortum Biomass Cogeneration Station Jelgava]. Available at: <https://www.fortum.lv/par-fortum/kontakti/fortum-biomasas-kogenerācijas-stacija-jelgava> (accessed 07.02.2019).

9. Biomasas izmantosanas ilgtspējības kriteriju pielietosana un pasakumu izstrade [Applying sustainability criteria for biomass use and developments]. Available at: <https://www.fortum.lv/par-fortum/kontakti/fortum-biomasas-kogenerācijas-stacija-jelgava> (accessed 09.02.2019).

10. Fedorenchik A. S., Lednitskiy A. V. *Energeticheskoye ispol'zovaniye nizkokachestvennoy drevesiny i drevesnykh otkhodov* [Energy use of low-quality wood and wood waste]. Minsk, BGTU Publ., 2010. 446 p.
11. Alakangas E. Properties of wood fuels used in Finland. Technical Research Centre of Finland, VTT Processes, Project report PRO2/P2030/05 (Project C5SU00800), Jyväskylä, 2005. 90 p.
12. EN ISO 17225-1:2014. Solid biofuels – Fuel specifications and classes. Part 1: General requirements. Stockholm, ISO, 2014. 66 p.

Информация об авторах

Савельев Александр – доктор технических наук, доцент кафедры лесопользования. Латвийский сельскохозяйственный университет (LV-3001, г. Елгава, ул. Лиела, 2, Латвийская Республика). E-mail: silvasav@inbox.lv

Арико Сергей Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: sergeyariko@mail.ru

Протас Павел Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: protas77@rambler.ru

Петерсонс Янис – доктор технических наук, ведущий специалист. ГАО «Латвийские государственные леса» (LV-1004, г. Рига, ул. Вайнодес, 1, Латвийская Республика). E-mail: agris.zimelis@llu.lv

Зимелис Агрис – магистр технических наук, ведущий специалист. Латвийский государственный лесохозяйственный исследовательский институт «Силава» (LV-2169, г. Саласпилс, ул. Ригас, 111, Латвийская Республика). E-mail: agris.zimelis@llu.lv

Information about the authors

Saveljev Aleksandr – DSc (Engineering), Assistant Professor, the Department of Forest Management. Latvian University of Agriculture (2, Liela str., LV-3001, Jelgava, Republic of Latvia). E-mail: silvasav@inbox.lv

Ariko Sergey Yevgen'evich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sergeyariko@mail.ru

Protas Pavel Aleksandrovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: protas77@rambler.ru

Janis Petersons – DSc (Engineering), Leading Specialist. Joint Stock Company “Latvia’s State Forest” (1, Vainodes str., LV-1004, Riga, Republic of Latvia). E-mail: silvasav@inbox.lv

Zimelis Agris – Master of Engineering, Leading Specialist. Latvian State Forest Research Institute “Silava” (111, Rigas str., LV-2169, Salaspils, Republic of Latvia). E-mail: agris.zimelis@llu.lv

Поступила 11.03.2019