

# ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС. ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

---

УДК 630\*83:674.8

Е. А. Леонов<sup>1</sup>, Д. В. Клоков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет

## ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАПАСОВ СЫРЬЯ В УСЛОВИЯХ КРУГЛОГОВОДОГО СПРОСА НА ЩЕПУ

В статье приведены исследования потоков древесного топлива в условиях предприятий лесного комплекса Беларуси, которые характеризуются месячными коэффициентами неравномерности поставки и сжигания соответственно. Определены параметры законов распределения данных случайных величин. Разработана методика по обоснованию оптимальных запасов древесного топлива, которая базируется на применении теории массового обслуживания. Представленная модель рассматривается как система «поставщик (транспортное средство) – склад древесного топлива с ограниченной относительной вместимостью – потребитель (котельная или мини-ТЭЦ)». Для такой системы входящим потоком является непрерывный поток древесного сырья (топлива), поступающего на площадку склада с интенсивностью, а выходящим потоком – непрерывный поток древесного топлива, поступающий на мини-ТЭЦ (котельную) с интенсивностью. Разработанная методика позволяет на стадии проектирования энергообъекта (котельной или мини-ТЭЦ) деревообрабатывающего предприятия прогнозировать оптимальную относительную вместимость склада древесного топлива в условиях круглогодичного спроса на щепу.

**Ключевые слова:** модель, склад, щепы, вероятность, параметры.

Е. А. Leonov<sup>1</sup>, D. V. Klovov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State Technological University

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University

## OPTIMIZATION OF RAW MATERIAL RESERVES IN THE CONDITIONS OF THE YEAR-ROUND DEMAND FOR THE WOOD CHIPS

The article presents research of wood fuel flows in the conditions of enterprises of the Belarusian forest complex, which are characterized by monthly coefficients of unevenness of supply and combustion, respectively. The parameters of the laws of the distribution of random variables are determined. A technique has been developed to justify the optimal reserves of wood fuel, which is based on the application of queuing theory. The presented model is considered as a system “supplier (vehicle) – wood fuel warehouse with limited relative capacity – consumer (boiler or mini-CHP)”. For such a system, the incoming flow is a continuous flow of wood raw materials (fuel) entering the storage site with intensity, and the outflow is a continuous stream of wood fuel entering the mini-cogeneration plant (boiler) with intensity. The developed technique allows at the stage of designing an energy facility (boiler or mini-CHP) of a woodworking enterprise to predict the optimum relative capacity of a wood fuel storage facility in conditions of year-round demand for wood chips.

**Key words:** model, storage, wood chips, probability, parameters.

**Введение.** Правительством Республики Беларусь приняты ряд государственных программ, которые стимулируют развитие энергетики на местных (возобновляемых) видах топлива (МВТ). В этой связи в стране ежегодно наращиваются объемы производства топливной щепы, в том числе из низкокачественной древесины, отходов лесозаготовок и деревообработки. По итогам 2016 г. производственные мощ-

ности предприятий системы Минлесхоза Республики Беларусь (основных поставщиков древесного топлива на энергообъекты) составили 5785,7 тыс. м<sup>3</sup> древесного топлива, в том числе 1745,8 тыс. м<sup>3</sup> топливной щепы.

В Республике Беларусь диверсификация производства тепловой и электрической энергии за счет вовлечения в производство местных видов топлива обеспечивается работой более

3000 котельных мощностью от 0,012 до 20 МВт, а также свыше 20 мини-ТЭЦ мощностью от 1,2 до 18 МВт, функционирующих в различных министерствах и ведомствах.

Производственный опыт работы энергетических объектов Министерства энергетики и Министерства жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь в различных регионах страны выявил неравномерность между динамикой месячных объемов поставки и потребления древесного сырья. Так, заготовка и поставка древесного топлива наиболее интенсивно производится в зимний и летний периоды, в то время как потребление топлива носит сезонный характер (пик потребления приходится на зимний период (рис. 1–2) [1–7].

Для оценки функционирования площадок древесного топлива предприятий, имеющих различные производственные мощности, в наших исследованиях был введен коэффициент неравномерности, который показывает, как отличается объем производства за конкретный ( $i$ -тый) интервал по сравнению со среднеинтервальным. Он равен частному от деления фактического (планируемого) объема производства в течение выделенного интервала времени на среднеинтервальный объем производства за исследуемый период:

$$K(t_i) = \frac{V(t_i)}{V_{\text{cp}}} = \frac{V(t_i)}{\frac{V_{\text{об}}}{n}} = \frac{n \cdot V(t_i)}{\sum_{i=1}^n V(t_i)}, \quad (1)$$

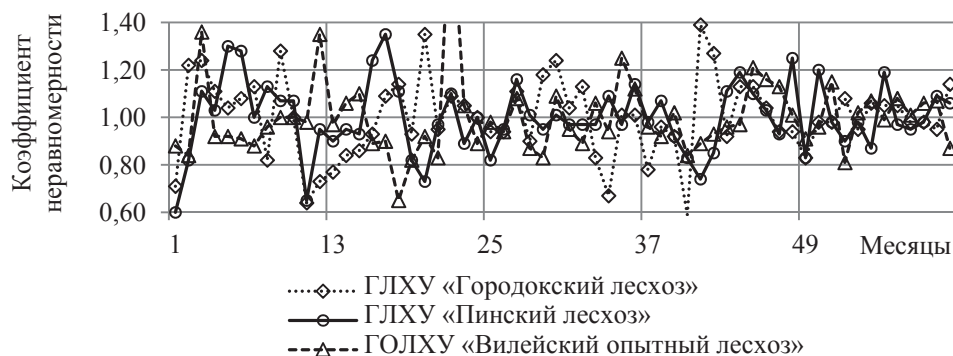


Рис. 1. Динамика неравномерности поставки древесного топлива (на примере нескольких поставщиков)

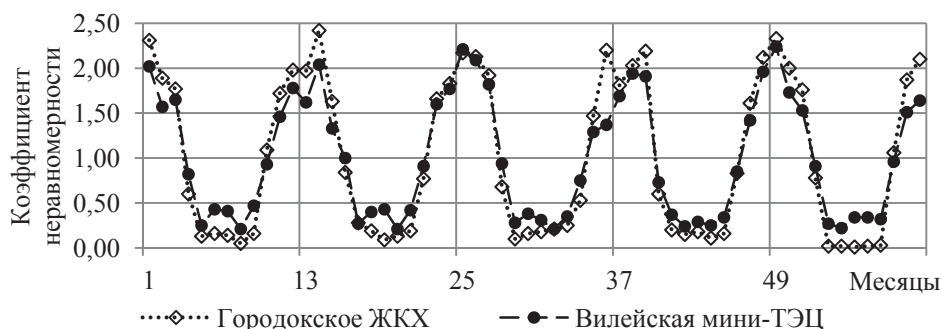


Рис. 2. Динамика неравномерности потребления древесного топлива (на примере нескольких потребителей)

где  $V(t_i)$  — фактический объем производства за  $i$ -тый месяц (в тысячах плотных кубических метрах), тыс. пл. м<sup>3</sup>;  $V_{\text{cp}}$  — среднеинтервальный объем производства за весь период работы, тыс. пл. м<sup>3</sup>;  $n$  — число интервалов, составляющих исследуемый период,  $i=1, n$ ;  $V_{\text{об}}$  — общий объем производства за весь период работы, тыс. пл. м<sup>3</sup>.

Такой подход позволяет в относительных величинах (безразмерных) через коэффициенты неравномерности определять максимальные и минимальные величины объемов операций за принятый интервал, а также следить за динамикой изменения значений  $K(t_i)$  во времени.

На основании полученных экспериментальных данных потоков древесного топлива и их статистической обработки установлено [3–7]:

- среднемесячная интенсивность поставки древесного топлива изменяется в течение года по нормальному закону с параметрами  $K$  и  $\sigma^2$  и для каждого поставщика индивидуальна (рис. 1);
- среднемесячная интенсивность потребления древесного топлива различными котельными и мини-ТЭЦ изменяется в течение года по периодическому закону и в зависимости от сезона года носит достаточно устойчивый характер (рис. 2).

Оценка расхождения между статистическим (эмпирическим) распределением проверялась по критериям согласия. Расхождение эмпирических и теоретических распределений не менее чем в 95% случаев подтвердилось критериями Пирсона и Колмогорова [4–6].

Система поставок древесного топлива должна предусматривать меры, позволяющие устранить (минимизировать) предполагаемые и непредвиденные нарушения процесса поставки. С этой целью заготовленная и вывезенная в летний сезон топливная древесина частично либо полностью укладывается в запас, который используется в период осенне-весенней распутицы, в выходные и праздничные дни и т. д. Обоснование вместимости склада древесного топлива со случайным объемом поступления биомассы и ее последующей отгрузки на котельную или мини-ТЭЦ в условиях сезонности спроса рассматривалось в [5–7].

Имеющиеся сегодня рекомендации по обоснованию рациональных площадок для хранения топливной древесины не учитывают в полной мере особенности функционирования мини-ТЭЦ, созданных или создаваемых в условиях производственной деятельности предприятий «Холдинга организаций деревообрабатывающей промышленности» Республики Беларусь (рис. 3).

Отличительным аспектом работы мини-ТЭЦ, входящих в структуру предприятий «Холдинга организаций деревообрабатывающей промышленности», является утилизация образующихся в процессе производственной деятельности древесных отходов с целью получения энергии на собственные технологические нужды (сушильное хозяйство, плитное производство и т. д.) [8–11]. При этом в отличие от мини-ТЭЦ системы Минэнерго и МинЖКХ данные энергообъекты характеризуются устойчивым в течение года спросом на древесное топливо [12–15].

С учетом вышеизложенного методика теоретических исследований включала в себя следующие этапы:

– выявление закономерностей функционирования площадки древесного топлива с учетом колебаний месячных объемов поставок то-

пливной древесины на мини-ТЭЦ и отсутствия сезонного характера ее сжигания;

– компьютерное имитационное моделирование устойчивого функционирования площадки древесного топлива в условиях круглогодичного спроса на топливную древесину со стороны мини-ТЭЦ деревообрабатывающих предприятий.

**Обоснование вместимости площадок хранения древесного топлива в условиях круглогодичного спроса.** На основании полученных и обработанных экспериментальных данных о потоках древесного топлива в условиях круглогодичного спроса на щепу установлено, что среднемесячные интенсивности поставки и потребления древесного топлива изменяются в течение года по нормальному закону с параметрами  $K$  и  $\sigma^2$ . При этом для каждого деревообрабатывающего предприятия «Холдинга организаций деревообрабатывающей промышленности» данные параметры индивидуальны.

В процессе имитационного моделирования площадка для хранения древесного топлива рассматривалась как система «поставщик (транспортное средство) – склад топливной древесины с ограниченной относительной вместимостью  $W_{отн}$  – мини-ТЭЦ». Для такой системы входящим потоком является непрерывный поток древесного топлива, поступающего на склад с интенсивностью  $K_{п}$  в месяц, а выходящим потоком – непрерывный поток топлива, поступающий на мини-ТЭЦ с интенсивностью  $K_c$  в месяц.

Объем древесного топлива на складе ( $Z_{скл}$ ) меняется случайно во времени в пределах от 0 до относительной вместимости склада  $W_{отн}$ :

$$Z_{скл} = \sum_{i=1}^{\infty} (K_i^n - K_i^c), \quad (2)$$

где  $K_i^n$  и  $K_i^c$  – коэффициенты неравномерности, соответственно, поставки и сжигания древесного топлива в  $i$ -том месяце.

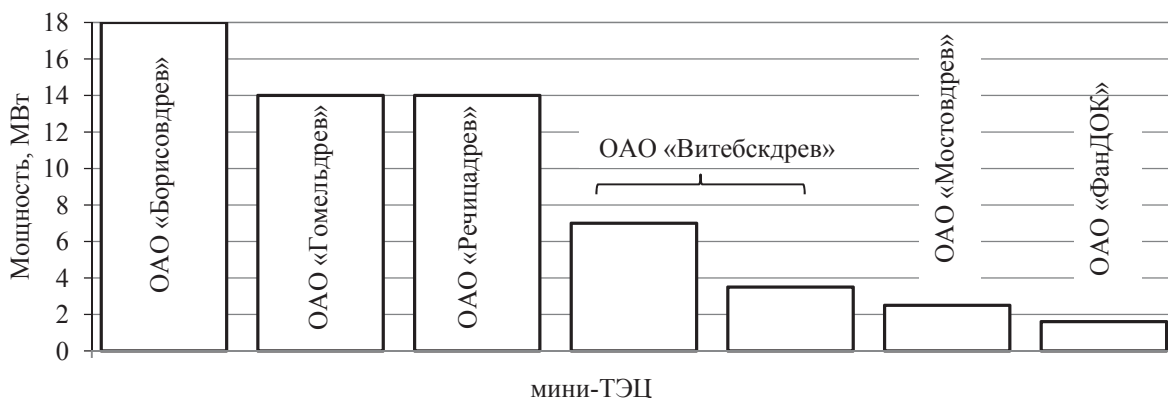


Рис. 3. Крупнейшие мини-ТЭЦ предприятий «Холдинга организаций деревообрабатывающей промышленности» Республики Беларусь

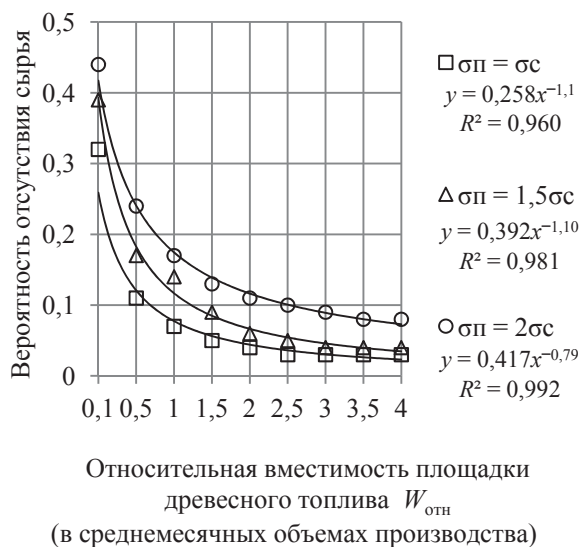


Рис. 4. Зависимость вероятности отсутствия сырья на площадке древесного топлива от величины ее относительной вместимости

Математическая модель строилась при допущении, что переходы состояний площадки древесного топлива осуществляются в фиксированные моменты времени мгновенно (система с дискретными состояниями и непрерывным временем).

Основываясь на вышеизложенном, для оценки влияния относительной вместимости площадки древесного топлива на вероятности ее переполнения и отсутствия на ней сырья в течение года (т. е. обеспечение устойчивой работы мини-ТЭЦ) авторами разработаны соответствующий алгоритм [5–7, 10] и программа расчета в пакете MATHCAD 14, основными этапами которой являются:

- последовательное вычисление разности между случайными значениями коэффициентов неравномерности поставки и потребления топливной древесины, генерируемые в соответствии с установленными законами распределения (нормальный закон с параметрами  $K$  и  $\sigma^2$ );

- суммирование полученных данных так, чтобы их сумма не переходила границы площадки древесного топлива (от 0 до  $W_{отн}$ );

- фиксирование случаев, при которых запас древесины был равным этим предельным границам и условно мог их превзойти;

- частное от деления количества таких случаев на общее число реализаций (вероятности отсутствия древесного топлива на площадке или ее переполнения) фиксируется программой и выводится на экран.

В качестве примера с учетом различных соотношений между отклонениями в поставке ( $\sigma_{п}$ ) и сжигании ( $\sigma_{с}$ ) топливной древесины на

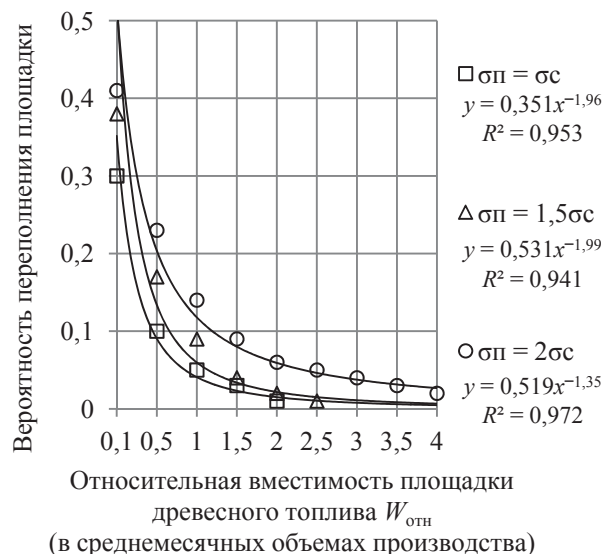


Рис. 5. Зависимость вероятности переполнения площадки древесного топлива от величины ее относительной вместимости

основании имитационного моделирования рассчитаны вероятности отсутствия древесного сырья на складе ( $P_{отс}$ ) и его переполнение ( $P_{пер}$ ) в зависимости от относительной вместимости площадки древесного топлива ( $W_{отн}$ ). Для получения результата с достоверностью 0,99 произведен расчет необходимого числа итераций. Число повторов для каждого значения составило 1200. Результаты расчетов представлены графически на рис. 4, 5.

Как видно из графиков, вероятности переполнения площадки древесного топлива ( $P_{пер}$ ) и отсутствия сырья на ней ( $P_{отс}$ ) резко снижаются с ростом ее относительной вместимости до 1,5–2,5-среднемесячных объемов производства. Оптимальное значение вместимости склада будет соответствовать минимуму удельных приведенных затрат непосредственно по складу древесного топлива, смежным операциям, от потерь и т. д.

**Заключение.** С учетом проведенных теоретических исследований функционирования площадки древесного топлива в условиях круглогодичного спроса на щепу можно сделать ряд выводов:

- неравномерность поставок и потребления древесного топлива на мини-ТЭЦ приводят к снижению загрузки машин и оборудования, потерям рабочего времени и т. д.;

- характер протекания поставки и потребления древесного топлива внутри года индивидуален для каждого предприятия, поэтому требует знания численных параметров фазовых работ конкретных предприятий;

- показателем, совокупно учитывающим влияние основных факторов на величину ме-

сячных объемов поставки и потребления древесного топлива, может быть коэффициент неравномерности  $K(t_i)$ ;

– при относительно постоянных условиях функционирования предприятий достоверные данные можно подучить на основании пяти последних лет работы;

– вероятности переполнения площадки древесного топлива и отсутствия сырья на ней рез-

ко снижаются с ростом ее относительной вместимости до 1,5–2,5-среднемесячных объемов производства;

– оптимальное значение вместимости площадки древесного топлива соответствует минимуму удельных приведенных затрат непосредственно по складу древесного топлива, смежным операциям, от потерь древесного вещества при хранении и т. д.

### Литература

1. Леонов Е. А., Федоренчик А. С. Оптимизация вместимости склада межсезонного хранения древесного топлива // Труды III Междунар. евразийского симпози. «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века». 2008. С. 62–66.
2. Леонов Е. А. Исследование хранения древесного топлива у потребителей // Труды БГТУ. Сер. 2, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2009. Вып. XVII. С. 89–93.
3. Леонов Е. А. Модель склада древесного топлива // Труды БГТУ. 2011. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 135–139.
4. Кулак М. И., Федоренчик А. С., Леонов Е. А. Прогнозирование хранения запасов топлива в условиях лесозаготовительных терминалов // Наука и инновации. 2012. № 7. С. 69–72.
5. Леонов Е. А., Федоренчик А. С. Имитационное моделирование устойчивого функционирования склада древесного топлива // Труды БГТУ. 2012. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 58–61.
6. Федоренчик А. С., Леонов Е. А. Лесозаготовительные терминалы: оптимизация параметров // Лесное и охотничье хоз-во. 2012. № 9. С. 10–15.
7. Федоренчик А. С., Леонов Е. А. Обеспечение устойчивого снабжения энергообъектов древесным топливом с созданием минимально необходимых запасов // Лесной вестник. 2014. № S2. С. 146–150.
8. Игнатенко В. В., Леонов Е. А. Установление рациональных параметров многооперационных машин в лесозаготовительной промышленности // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 5–4. С. 291–295.
9. Леонов Е. А., Игнатенко В. В., Клоков Д. В. Математическая модель работы рубильной машины с учетом ее технических отказов // Труды БГТУ. 2016. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 40–44.
10. Леонов Е. А. Устойчивое снабжение энергообъектов древесным топливом с созданием минимально необходимых запасов // Труды БГТУ. 2014. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 17–19.
11. Клоков Д. В., Леонов Е. А., Турлай И. В. Модель работы форвардера с учетом надежности // Труды БГТУ. 2015. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 23–26.
12. Клоков Д. В., Турлай И. В., Леонов Е. А. Оборудование лесопромышленных предприятий. Лабораторный практикум. Минск: БГТУ, 2015. 200 с.
13. Технология и оборудование комплексного использования древесного сырья. Практикум / А. С. Федоренчик [и др.]. Минск: БГТУ, 2014. 274 с.
14. Федоренчик А. С., Клоков Д. В., Леонов Е. А. Энергетическое использование древесной биомассы. Практикум. Минск: БГТУ, 2015. 212 с.
15. Федоренчик А. С., Клоков Д. В., Леонов Е. А. Технология и оборудование лесосечных и лесоскладских работ. Минск: БГТУ, 2016. 204 с.

### References

1. Leonov E. A., Fedorenchik A. S. Optimization of the storage capacity of the off-season storage of wood fuel. *Trudy III Mezhdunar. evraziyskogo simpoziuma («Derevoobrabotka: tekhnologii, oborudovaniye, menedzhment XXI veka»)* [Proceedings of III International The Eurasian Symposium («Woodworking: technologies, equipment, management of the XXI of century»)], 2008, pp. 62–66 (In Russian).
2. Leonov E. A. Research of storage of wood fuel from consumers. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 2, Forest and Woodworking Industry, 2009, issue XVII, pp. 89–93 (In Russian).
3. Leonov E. A. Model of wood fuel storage. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2011, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 135–139 (In Russian).
4. Kulak M. I., Fedorenchik A. S., Leonov E. A. Forecasting the storage of fuel reserves in the context of forest energy terminals. *Nauka i innovatsii* [Science and Innovation], 2012, no. 7, pp. 69–72 (In Russian).

5. Leonov E. A., Fedorenchik A. S. Simulation modeling of sustainable functioning of wood fuel storage. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 58–61 (In Russian).
6. Fedorenchik A. S., Leonov E. A. Forest energy terminals: optimization of parameters. *Lesnoye i okhotnich'ye khozyaystvo* [Forestry and Hunting], 2012, no. 9, pp. 10–15 (In Russian).
7. Fedorenchik A. S., Leonov E. A. Ensuring sustainable supply of energy facilities with wood fuel with the creation of the minimum required reserves. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2014, no. S2, pp. 146–150 (In Russian).
8. Ignatenko V. V., Leonov E. A. Establishment of rational parameters of multi-operation machines in the timber industry. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], 2015, no. 5–4, pp. 291–295 (In Russian).
9. Leonov E. A., Ignatenko V. V., Klokov D. V. The mathematical model of chipper work given its technical failures. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 40–44 (In Russian).
10. Leonov E. A. Sustainable supply of wood fuel energy facilities with the establishment of minimum required reserves. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 17–19 (In Russian).
11. Klokov D. V., Leonov E. A., Turlay I. V. Model of forwarder work in respect of reliability. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 23–26 (In Russian).
12. Klokov D. V., Turlay I. V., Leonov E. A. *Oborudovaniye lesopromyshlennykh predpriyatiy. Laboratornyy praktikum* [Equipment timber companies. Laboratory practicum]. Minsk, BGTU Publ., 2015. 200 p.
13. Fedorenchik A. S., Mokhov S. P., Klokov D. V., Leonov E. A. *Tekhnologiya i oborudovaniye kompleksnogo ispol'zovaniya drevesnogo syr'ya. Praktikum* [Technology and equipment for the integrated use of wood raw material. Practical work]. Minsk, BGTU Publ., 2014. 274 p.
14. Fedorenchik A. S., Klokov D. V., Leonov E. A. *Energeticheskoye ispol'zovaniye drevesnoy biomassy. Praktikum* [Energy use of wood biomass. Practical work]. Minsk, BGTU Publ., 2015. 212 p.
15. Fedorenchik A. S., Klokov D. V., Leonov E. A. *Tekhnologiya i oborudovaniye lesoskladskikh i lesoskladskikh rabot* [Energy use of wood biomass. Practical work]. Minsk, BGTU Publ., 2016. 204 p.

#### Информация об авторах

**Леонов Евгений Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: debager13@rambler.ru

**Клоков Дмитрий Викторович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная графика машиностроительного профиля». Белорусский национальный технический университет (220013, г. Минск, ул. Я. Коласа, 12, Республика Беларусь). E-mail: klokov\_dm@belstu.by

#### Information about the authors

**Leonov Evgeniy Anatol'yevich** – PhD (Engineering), 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: debager13@rambler.ru

**Klokov Dmitriy Viktorovich** – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Engineering Graphics for Machine-Building. Belarusian National Technical University (12, Y. Kolasa str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: klokov\_dm@mail.ru

Поступила 28.02.2018