

УДК 630*83:674.8

Е. А. Леонов¹, Д. В. Клоков², А. А. Гарабазхиу¹, А. А. Духовник¹¹Белорусский государственный технологический университет²Белорусский национальный технический университет**ВЛИЯНИЕ СРОКОВ ХРАНЕНИЯ ДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ
И ТОПЛИВНОЙ ЩЕПЫ НА ИХ ТЕПЛОТВОРНУЮ СПОСОБНОСТЬ**

В статье рассмотрены актуальные вопросы хранения древесного топлива из низкокачественной древесины и отходов в условиях лесоэнергетических терминалов мини-ТЭЦ деревообрабатывающих предприятий Республики Беларусь. Особенностью данных энергетических объектов является выработка тепловой энергии на собственные технологические нужды, а также равномерный в течение года спрос на топливную щепу. Разработана технологическая схема производства топливной щепы на терминалах мини-ТЭЦ деревообрабатывающих предприятий. Ее особенностью является совместное размещение на территории терминала штабелей неизмельченного дровяного долготья и огороженного бурта для топливной щепы и отходов деревообрабатывающего производства (кусковые древесные отходы, опилки, отсев и т. д.). Влажность оказывает существенное влияние на качество и энергетические свойства древесного топлива. Предложена методика исследования изменения влажности и потерь древесины при хранении различных видов древесного топлива (щепы различного качества, опилки и кора) у потребителей. Проведен анализ существующих способов хранения древесины. Их достоинства и недостатки уточняются. На основании предварительных исследований сформулированы несколько выводов. С целью повышения теплотворной способности сжигаемого древесного сырья даны рекомендации по обустройству площадки терминала, особенностям складирования хранения древесины. Проведенные экспериментальные исследования открытого кучевого хранения некоторых видов вторичных ресурсов и топливной щепы позволили обосновать рациональные сроки их хранения, обеспечивающие оптимальную теплотворную способность и минимальные потери древесного вещества.

Ключевые слова: отходы, щепы, влажность, потери, хранение, теплотворная способность.

E. A. Leonov¹, D. V. Klokov², A. A. Garabazhiu¹, A. A. Dukhovnik¹¹Belarusian State Technological University²Belarusian National Technical University**INFLUENCE OF THE WOOD RAW MATERIALS AND FUEL CHIPS
STORAGE TERMS ON THEIR HEATING ABILITY**

The article discusses current issues of wood fuel storage from low-quality wood and residues in the conditions of mini-CHP forest-energy terminals of woodworking enterprises of the Republic of Belarus. A feature of these energy facilities is the generation of thermal energy for their own technological needs, as well as the uniform demand for fuel chips throughout the year. The technological scheme of fuel chips production at the terminals of mini-CHP of woodworking enterprises has been developed. Its peculiarity is the joint placement in the terminal area of stacks of not crushed wood longest and fenced collar for fuel chips and waste woodworking production (lumpy wood waste, sawdust, screenings, etc.). Moisture renders significant influence on quality and power properties of wood fuel. The research technique of a moisture and wood losses change during storage of various kinds of wood fuel (chips of various quality, sawdust and a bark) at consumers is offered. The analysis of existing methods of storage of wood is carried out. Their merits and demerits are specified. On the basis of preliminary researches are formulated a several of conclusions. In order to increase the calorific value of the burned wood raw material, recommendations are given on the arrangement of the terminal site and on the specifics of storing wood storage. The experimental studies of the open cumulus storage of certain types of secondary resources and fuel chips allowed substantiating rational storage periods that provide optimal calorific value and minimal loss of wood substance.

Key words: residues, wood chips, moisture, losses, storage, calorific value.

Введение. В целях импортозамещения традиционных видов топлива (природного газа, мазута и т. д.), а также утилизации древесных отходов лесного комплекса на ряде пред-

приятий производство тепловой и электрической энергии осуществляется из различных видов древесной биомассы. На сегодняшний день в стране выработка «зеленой» энергии

осуществляется на 20 мини-ТЭЦ мощностью от 1,2 до 18 МВт, а также на более чем 3000 котельных мощностью от 0,012 до 20 МВт [1–4].

Применительно к лесному комплексу на предприятиях Холдинга организаций деревообрабатывающей промышленности функционирует ряд отраслевых мини-ТЭЦ, особенностью которых является получение энергии для собственных технологических нужд (сушильное хозяйство, плитное производство и т. д.) за счет сжигания древесных отходов, образующихся в процессе основной производственной деятельности [5, 6].

Производственный опыт работы данных энергообъектов подразумевает создание в непосредственной близости от мини-ТЭЦ производственного участка (лесоэнергетического терминала) для складирования, временного хранения, подготовки к сжиганию и измельчения дровяной древесины и древесных отходов. При этом площадка терминала должна иметь асфальтовое или бетонное покрытие на достаточно прочном основании, препятствующее продавливанию почвы и образованию колеи при работе рубильной машины и погрузчика, а продольная ось штабелей (буртов), по возможности, должна быть направлена в сторону естественного стока ливневых вод. Уклон покрытия площадки в поперечном направлении в обе стороны от продольной оси штабеля (бурта) следует делать 8–10%, вдоль бурта в сторону стока – 1,5–2% (рис. 1) [5, 6].

В процессе открытого кучевого хранения древесного топлива, с одной стороны, происходит его атмосферная сушка и повышается теплотворная способность, а с другой – происходит естественная биологическая деструкция, приводящая к потерям древесного вещества. В этой связи вопросы оптимизации сроков хранения топливной древесины, обеспечивающие

эффективное ее сжигание при минимальных потерях, являются весьма актуальными [7, 8].

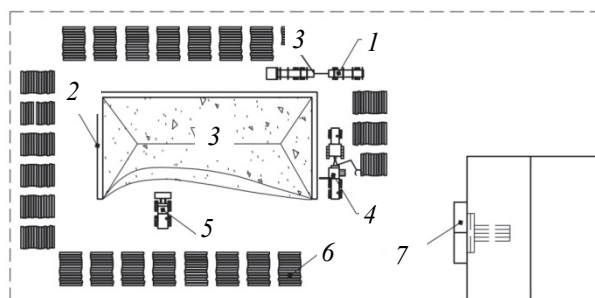


Рис. 1. Технологическая схема функционирования лесоэнергетических терминалов мини-ТЭЦ деревообрабатывающих предприятий:
 1 – сортиментовоз; 2 – сплошной забор, загораживающий измельченное древесное топливо;
 3 – бурт щепы и отходов производства (кусковых и мягких);
 4 – передвижная рубильная машина; 5 – ковшовый лесопогрузчик; 6 – штабели дровяного долготья; 7 – расходные топливные бункеры котлов мини-ТЭЦ

Основная часть. С целью исследования изменений размерно-качественных характеристик вторичного древесного сырья и топливной щепы, влияющих на их теплотворную способность, в условиях сертифицированной ЦЗЛ ОАО «Витебскдрев» был проведен ряд натуральных экспериментов [7, 8, 9].

Объектами исследований являлись следующие виды щепы и вторичного древесного сырья: технологическая щепа хвойных пород; топливная щепа из дровяной древесины; топливная щепа из отходов лесозаготовок; опилки хвойных пород; кора хвойных пород.

Характеристика исследуемых видов энергетического сырья приведена в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Фракционный состав принятых к исследованию видов щепы, % (определен по ГОСТ 15815–83)

Массовая доля, %	Технологическая щепа из деловой древесины (хвойная)	Топливная щепа (лиственнная)	
		из дровяной древесины	из отходов лесозаготовок
Кора и гниль	0	9,0	38,0
Остатки на ситах с отверстиями диаметром:			
30 мм	19,5	5,0	3,2
20 и 10 мм	75,0	65,9	75,8
5 мм	5,0	24,2	16,1
Остатков на поддоне	0,5	4,9	4,9
Итого	100,0	100,0	100,0

Таблица 2

**Насыпная плотность принятых к исследованию видов древесного топлива, кг/м³
(определен по ГОСТ 16362–86)**

Технологическая щепка из деловой древесины (хвойная)	Топливная щепка (лиственная)		Опилки хвойные	Кора хвойная
	из дровяной древесины	из отходов лесозаготовок		
310	255	255	230	320

В процессе открытого хранения в кучах измельченного древесного топлива наблюдалось перераспределение влаги и образование двух слоев: внутреннего и наружного. При этом осуществлялось подсыхание внутреннего (основного) слоя и увеличение влажности наружного (20–40 см) слоя. При отсутствии процесса саморазогревания влажность внутреннего слоя практически не менялась (биотопливо медленно подсыхало), а влажность наружного зависела от метеорологических условий [10, 11].

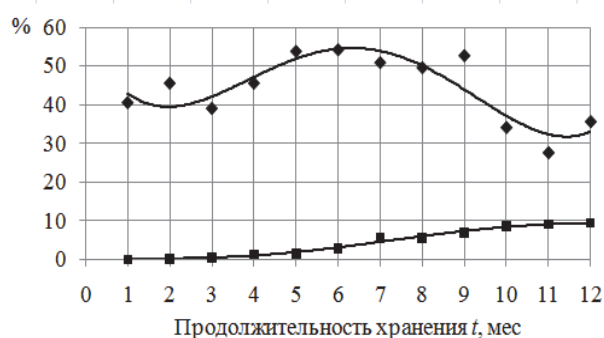
На рис. 2 представлены выборочные результаты динамики изменения относительной влажности (внутреннего слоя) исследованных видов древесного топлива при длительном открытом кучевом хранении [10, 11].

Установлено, что из исследуемых видов топлива при кучевом хранении наименьшей относительной влажностью, имеющей устойчивую тенденцию к снижению, обладают неизмельченные сучья и ветви (рис. 2, б). Это указывает на большую целесообразность их хранения в неизмельченном виде, чем хранение полученной из них топливной щепы.

Относительная влажность внутреннего слоя щепы, полученной из дровяной древесины, при длительном хранении в весенне-летний период имеет тенденцию к возрастанию до 60%. При хранении топливной щепы из лесосечных отходов в летний период, наоборот, наблюдается снижение ее относительной влажности до 40% (рис. 2, а).

По результатам исследований установлено, что длительное открытое кучевое хранение щепы из стволовой части дерева, коры и опилок более целесообразно (с точки зрения подсушивания и роста теплотворной способности) под навесом или укрытием из различных водонепроницаемых материалов в виде полиэтиленовой пленки, брезента и др.

В процессе длительного открытого кучевого хранения древесного топлива неизбежны потери древесного вещества (биомассы). Уменьшение объемного веса топливного сырья связано с уменьшением содержания древесных смол, процессами гниения и образованием свободной уксусной кислоты, которая частично улетучивается [11]. Величина среднемесячных потерь зависит от срока хранения, сезона и вида складываемой биомассы.



◆ Динамика изменения относительной влажности
 $W(t) = 0,0374t^4 - 0,9815t^3 + 7,9917t^2 - 21,1t + 56,966$
 $R^2 = 0,7807$

■ Динамика изменения потерь
 $\Delta(t) = \frac{9,985 \cdot 0,11}{0,11 + (9,985 - 0,11)e^{-9,985 \cdot 0,062t}}$

а



◆ Динамика изменения относительной влажности
 $W(t) = 0,0468t^4 - 1,0712t^3 + 7,5474t^2 - 19,344t + 53,282$
 $R^2 = 0,902$

■ Динамика изменения потерь
 $\Delta(t) = \frac{9,143 \cdot 0,012}{0,012 + (9,143 - 0,012)e^{-9,143 \cdot 0,088t}}$

б

Рис. 2. Исследование открытого кучевого хранения энергетического древесного сырья:
 а – щепка из отходов лесозаготовок; б – неизмельченные сучья и ветви

Установлено, что величина потерь древесного вещества в исследуемых видах топлива описывается логистической функцией

$$\Delta(t) = \frac{Ay_0}{y_0 + (A - y_0)e^{-Abt}}, \quad (1)$$

где A – асимптота функции; y_0 – начальное значение функции Δ ; b – коэффициент, зависящий от вида топлива; t – продолжительность хранения древесного топлива в месяцах.

На рис. 2 и в табл. 3 представлены выборочные результаты исследований потерь древесного вещества при открытом способе хранения некоторых видов древесного топлива.

Проведенные исследования показали, что процессы, приводящие к потерям древесного топлива при хранении, проходят в три стадии. На первой стадии, продолжительностью 5–6 месяцев, топливо хранится стабильно, потеря массы не превышает 1%. На второй стадии происходит рост потерь с различной степенью интенсивности. На третьей стадии нарастание потерь, как правило, существенно замедляется. При этом процесс разрушения измельченного древесного топлива происходит более интенсивно, чем у неизмельченного.

Из рассмотренных видов древесного топлива кора наиболее подвержена процессам деструкции, поэтому требует минимальных сроков хранения и первоочередного использования (сжигания).

При хранении древесного топлива в кучах (валах) в результате физических, химических и микробиологических процессов происходит уменьшение объемного веса щепы. При этом потери объемного веса биомассы в среднем составляют 0,8–1,5% в месяц [8, 11–14].

Проведенные экспериментальные исследования позволяют произвести теоретический расчет изменения динамики теплотворной способности (низшей теплоты сгорания) основных видов щепы и вторичного древесного сырья в зависимости от продолжительности их открытого кучевого хранения:

$$Q_n = 18,9 - 0,214W(t) - 0,189A^p - \frac{\Delta(t)}{100}, \quad (2)$$

где 18,9 – теплота сгорания 1 кг абсолютно сухого древесного вещества, МДж/кг; $W(t)$ – функция изменения влажности древесного топлива от продолжительности открытого кучевого хранения, %; A^p – зольность древесного топлива, %; $\Delta(t)$ – логистическая функция потерь древесного вещества при длительном открытом кучевом хранении, %.

На рис. 3 приведены выборочные результаты теоретических исследований влияния сроков открытого кучевого хранения на величину теплотворной способности топливной щепы и некоторых видов вторичного древесного сырья.



Рис. 3. Влияние продолжительности хранения основных видов древесного топлива на величину их низшей теплоты сгорания

Из графиков рис. 3 видно, что наибольшей теплотворной способностью обладают неизмельченные отходы лесозаготовок (сучья и ветви), которые наряду с опилками хвойных пород отличаются высокой устойчивостью к длительному открытому кучевому хранению, проявляемой в незначительном по отношению к щепе из отходов лесозаготовок изменении низшей теплоты сгорания.

Таблица 3

Значения параметров логистической функции для потерь различных видов древесного топлива при открытом способе хранения

Вид древесного топлива	Слой при хранении	Значения параметров			Критерий F_p
		A , %	b , 1/мес.	y_0 , %	
Щепа лиственных пород из отходов лесозаготовок	Наружный	9,841	0,069	0,070	1,039
	Внутренний	9,985	0,062	0,110	1,046
Сучья и ветви	Наружный	8,829	0,134	0,011	1,044
	Внутренний	9,143	0,088	0,012	1,009
Опилки хвойных пород	Наружный	7,588	0,141	0,005	1,006
	Внутренний	7,499	0,141	0,005	1,000

Рекомендуемые сроки хранения сучьев, ветвей и опилок хвойных пород при их атмосферной сушке не должны превышать 3,5–4 месяца, в то время как для топливной щепы из отходов лесозаготовок данный показатель составляет 1,5–2,5 месяца.

Заключение. Для снижения расхода древесного топлива при выработке единицы энергии котельными или мини-ТЭЦ рекомендуется:

– в целях уменьшения древесных потерь и лучшего подсушивания межсезонный запас древесного топлива формировать преимуще-

ственно из неизмельченной древесины; топливную щепу на складе хранить только в качестве страховых, межоперационных или неснижаемых запасов, которые периодически необходимо обновлять; минимальные сроки хранения и первоочередное сжигание древесной коры;

– в целях эффективного сжигания топливного сырья сроки хранения неизмельченных сучьев, ветвей и опилок не должны превышать 3,5–4 месяца; оптимальные сроки хранения топливной щепы находятся в диапазоне 1,5–2,5 месяца.

Список литературы

1. Клоков Д. В., Турлай И. В., Леонов Е. А. Оборудование лесопромышленных предприятий. Лабораторный практикум. Минск: БГТУ, 2015. 200 с.
2. Технология и оборудование комплексного использования древесного сырья. Практикум / А. С. Федоренчик [и др.]. Минск: БГТУ, 2014. 274 с.
3. Федоренчик А. С., Клоков Д. В., Леонов Е. А. Энергетическое использование древесной биомассы. Практикум. Минск: БГТУ, 2015. 212 с.
4. Федоренчик А. С., Клоков Д. В., Леонов Е. А. Технология и оборудование лесосечных и лесоскладских работ. Минск: БГТУ, 2016. 204 с.
5. Леонов Е. А., Клоков Д. В. Оптимизация запасов сырья в условиях круглогодичного спроса на щепу // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2019. № 1 (216). С. 89–94.
6. Леонов Е. А., Клоков Д. В. Производство топливной щепы на лесоэнергетических терминалах деревообрабатывающих предприятий // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2019. № 1 (216). С. 95–99.
7. Леонов Е. А., Федоренчик А. С. Оптимизация вместимости склада межсезонного хранения древесного топлива // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды III Международ. евразийского симпозиума. Воронеж, 2008. С. 62–66.
8. Леонов Е. А. Исследование хранения древесного топлива у потребителей // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревооб. пром-сть. 2009. Вып. XVII. С. 89–93.
9. Леонов Е. А., Федоренчик А. С. Имитационное моделирование устойчивого функционирования склада древесного топлива // Труды БГТУ. 2012. № 2: Лесная и деревооб. пром-сть. С. 58–61.
10. Федоренчик А. С., Леонов Е. А. Лесоэнергетические терминалы: оптимизация параметров // Лесное и охотничье хоз-во. 2012. № 9. С. 10–15.
11. Кулак М. И., Федоренчик А. С., Леонов Е. А. Прогнозирование хранения запасов топлива в условиях лесоэнергетических терминалов // Наука и инновации. 2012. № 7. С. 69–72.
12. Федоренчик А. С., Леонов Е. А. Обеспечение устойчивого снабжения энергообъектов древесным топливом с созданием минимально необходимых запасов // Лесной вестник. 2014. № S2. С. 146–150.
13. 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 деревооб. пром-сть. С. 40–44.
14. Леонов Е. А. Устойчивое снабжение энергообъектов древесным топливом с созданием минимально необходимых запасов // Труды БГТУ. 2014. № 2: Лесная и деревооб. пром-сть. С. 17–19.

References

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Fedorenchik A. S., Klokov D. V., Leonov E. A. *Tekhnologiya i oborudovaniye lesoschnykh i lesoskladskikh rabot* [Technology and equipment for logging and timber works]. Minsk, BGTU Publ., 2016. 204 p.

5. Leonov E. A., Klokov D. V. Optimization of raw material reserves in the conditions of the year-round demand for the wood chips. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2019, no. 1 (216), pp. 89–94 (In Russian).

6. Leonov E. A., Klokov D. V. Fuel chips production at the wood-energy terminals of wood processing enterprises. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2019, no. 1 (216), pp. 95–99 (In Russian).

7. Leonov E. A., Fedorenchik A. S. Optimization of the storage capacity of the off-season storage of wood fuel. *Derevoobrabotka: tekhnologii, oborudovaniye, menedzhment XXI veka: trudy III Mezhdunar. evraziyskogo simpoziuma* [Woodworking: technologies, equipment, management of the XXI of century: Proceedings of III International The Eurasian Symposium], Voronezh, 2008, pp. 62–66 (In Russian).

8. Leonov E. A. Research of storage of wood fuel from consumers. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 2, Forest and Woodworking Industry, 2009, issue 17, pp. 89–93 (In Russian).

9. 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).

10. 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).

11. 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).

12. 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).

13. 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).

14. Leonov E. A. Sustainable supply of wood fuel energy facilities with the establishment of minimum required reserves. *Trudy BGTU* [Proceedings BSTU], 2014, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 17–19 (In Russian).

Информация об авторах

Леонов Евгений Анатольевич – 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: 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

Гарабажу Александр Андреевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инженерной графики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: garazh@tut.by.

Духовник Аlesia Александровна – студентка. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: alesya.duhovnik@mail.ru

Information about the authors

Leonov Evgeniy Anatol'yevich – 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: 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

Garabazhiu Aleksandr Andreyevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Engineering Drawing. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: garazh@tut.by

Dukhovnik Alesia Aleksandrovna – student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alesya.duhovnik@mail.ru

Поступила 11.03.2020