

2. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ЛЕСОЗАГОТОВОК

УДК 519.7

А.М. Воронова

ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТЫ КОМПЛЕКСА УСТАНОВОК ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТОПЛИВНОЙ ЩЕПЫ

Введение. Энергосбережение и переход на более экологичные виды топлива требуют внедрения нового оборудования и умения правильно его использовать. Для некоторых регионов России с развитой лесопромышленной отраслью актуальным является перевод котельных, работающих на угле и мазуте, на местные виды топлива, например, топливную щепу. Лесозаготовительные предприятия кроме основной продукции производят большое количество отходов, которые могут быть переработаны в топливную щепу. При правильном использовании отходов лесопереработки становится достаточно для того, чтобы отапливать сами лесозаготовительные предприятия и расположенные поблизости лесные поселки [Gerasimov и др., 2011; Шегельман и др., 2011; Gerasimov и др., 2013; Шукин и др., 2012].

Топливную щепу отличает низкая стоимость сырья для ее производства и дорогая транспортировка, поэтому ее рационально производить из отходов древесины и дров непосредственно в том месте, где она далее будет использоваться для отопления. Кроме того, для производства топливной щепы из древесного сырья требуется щепорубительная установка. Не рационально приобретать для каждого небольшого котельного пункта свою щепорубительную установку, которая будет большую часть времени простаивать. Достаточно приобрести несколько мобильных щепорубительных установок, которые могут перемещаться между всеми котельными пунктами и создавать там запасы топливной щепы. В таком случае щепорубительные установки будут эффективно использоваться [Суханов и др., 2011; Laitila и др., 2012].

В статье рассматривается вариант составления согласованного плана движения множества рубительных установок для обеспечения запасом топлива котельных пунктов, работающих на топливной щепе [Щеголева, 2010].

В таком случае необходимо составить согласованный план движения нескольких мобильных установок, который показывает очередность объезда пунктов и необходимые объемы топливной щепы, которые нужно создать в котельных пунктах, чтобы обеспечить запас топлива до следующего приезда одной из мобильных установок в следующий цикл ее работы. Таким образом, одна передвижная рубильная установка может обслуживать несколько котельных пунктов.

Планированию движения установок необходимо уделять достаточное внимание. Без осуществления таких подготовительных работ, без составления графика работы возможна ситуация, когда в зимние месяцы установки не успеют в нужное время объехать все котельные пункты, что приведет к аварийному режиму работы персонала и оборудования без выходных и может привести к замораживанию поселков [Васильев и др., 2001; Суханов и др., 2013].

Так возникает задача составления согласованного плана работы нескольких передвижных установок, составления оптимального графика движения каждой передвижной установки между котельными пунктами с учетом производительности установок [Булатов и др., 2001; Герасимов и др., 2011; Щеголева, 2005; Щеголева, 2010; Voronova и др., 2022]. При планировании перемещения установок необходимо, чтобы в течение всего периода планирования каждый котельный пункт был обеспечен необходимым запасом топлива, и при этом нужно минимизировать время на перемещение установок между котельными пунктами. Задача является актуальной, так как направлена на составление графика движения установок по производству щепы, благодаря которому должны повыситься своевременность и качество предоставления услуги по обеспечению теплом населенных пунктов.

Материалы и методика исследования. Приведем математическую модель предметной области. Математическая модель предназначена для описания движения нескольких передвижных рубильных установок между котельными пунктами производительности установок, с учетом стоимости перемещения между котельными пунктами, потребностей в топливной щепе котельных пунктов. Периодом планирования движения установок является весь отопительный сезон с сентября по май и период подготовки к отопительному сезону (август) – время, в течение которого рубильные машины посетят все котельные пункты столько раз, сколько это необходимо согласно потребностям котельных пунктов.

Введем обозначения. Индексные множества:

M – множество котельных, работающих на топливной щепе;

N – множество передвижных установок (машин) для производства топливной щепы;

T – множество дней.

Входные данные задачи:

R_j – производительность машины j (количество плотных кубометров топливной щепы, перерабатываемое за смену работы установки – 8 часов), $j \in N$;

$V'_{i,p}$ – потребность в топливной щепе (количество плотных кубометров) котельного пункта i в день p , $i \in M, p \in T$.

$V''_{i,p}$ – максимальный запас топливной щепы (количество плотных кубометров) для котельного пункта i в день p , $i \in M, p \in T$. Максимальный запас топливной щепы, который нужно создать, может определяться количеством дров, которые приготовлены в данном пункте на рубку. Максимальный запас топливной щепы может определяться свободным объемом склада. Для того чтобы не создавать лишних запасов топливной щепы, необходимо максимальный запас топливной щепы в последний день отопительного сезона сделать равным (или близким к) 0.

$A_{i,k,j}$ – стоимость передвижения от котельной i до котельной k для передвижной установки j , $i \in M, k \in M, j \in N$;

Переменные задачи:

X_{ip} – объем топливной щепы (количество плотных кубометров), который произведет некоторая машина в пункте i в день p , $i \in M, p \in T$.

W_{ip} – запас топливной щепы (количество плотных кубометров), который находится в котельном пункте i в день p , $i \in M, p \in T$.

Введем булеву переменную, которая является индикатором того, что в некоторый день некоторая передвижная установка едет из пункта-источника (котельный пункт, который покидает рубильная машина) в пункт-приемник (котельный пункт, в который направляется рубильная машина):

$$Z_{i,k,p,j} = \begin{cases} 1, & \text{если машина } j \text{ в день } p \text{ едет} \\ & \text{из котельного пункта } i \text{ в котельный пункт } k; \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

$$i \in M, k \in M, p \in T, j \in N.$$

Введем булеву переменную, которая является индикатором того, что некоторая машина в определенный день работает в некотором котельном пункте.

$$Y_{i,p,j} = \begin{cases} 1, & \text{если машина } j \text{ в день } p \text{ работает в котельном пункте } i; \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

$$i \in M, \quad p \in T, \quad j \in N.$$

Соотношения математической модели:

В каждый пункт-приемник в один и тот же день должно ехать не более одной передвижной установки (т.е. сумма по всем передвижным установкам и по всем котельным пунктам-источникам индикатора перемещения Z_{ikpj} должна быть не более 1); ограничение не допускает ситуацию, когда из нескольких пунктов-источников едут рубильные установки в один и тот же пункт:

$$\sum_{j \in N} \sum_{i \in M} Z_{i,k,p,j} \leq 1, \quad \forall k \in M, \quad \forall p \in T. \quad (1)$$

Из одного пункта-источника передвижная установка может ехать только в один пункт-приемник (т.е. сумма по всем передвижным установкам и по всем котельным пунктам-приемникам индикатора перемещения Z_{ikpj} должна быть не более 1); ограничение не допускает ситуацию, когда из одного котельного пункта-источника рубильная установка перемещается сразу в несколько котельных пунктов-приемников:

$$\sum_{j \in N} \sum_{k \in M} Z_{i,k,p,j} \leq 1, \quad \forall i \in M, \quad \forall p \in T. \quad (2)$$

Каждая передвижная установка в каждый день должна находиться только в одном котельном пункте (ограничение не допускает ситуацию, когда одна передвижная установка в один и тот же день находится сразу в нескольких котельных пунктах):

$$\sum_{i \in M} \sum_{k \in M} Z_{i,k,p,j} \leq 1, \quad \forall p \in T, \quad \forall j \in N. \quad (3)$$

Определим соотношение между булевыми переменными: оно показывает, что если машина работает в пункте-источнике, значит, поедет в некоторый котельный пункт-приемник, причем пункт-источник и пункт-приемник могут совпадать (т.е. машина остается работать в том же пункте).

$$Y_{i,p,j} = \sum_{k \in M} Z_{i,k,p,j}, \quad \forall i \in M, \quad \forall p \in T, \quad \forall j \in N. \quad (4)$$

Соотношение показывает, что если машина едет из некоторого пункта-источника в пункт-приемник, то на следующий день эта машина работает в пункте-приемнике:

$$\sum_{i \in M} Z_{i,k,p,j} = Y_{k,(p+1),j}, \quad \forall k \in M, \quad \forall p \in T, \quad \forall j \in N. \quad (5)$$

Ограничение на возможности передвижных установок: в каждом котельном пункте в каждый день может быть произведено топливной щепы не более, чем это позволяет производительность той рубильной установки, которая в этот день работает в котельном пункте.

$$\sum_{j \in N} R_j \cdot Y_{i,p,j} \geq X_{i,p}, \quad \forall i \in M, \quad \forall p \in T. \quad (6)$$

Объем произведенной топливной щепы для каждого котельного пункта (котельного пункта i) каждый день (в день p) должен быть не отрицателен:

$$X_{i,p} \geq 0, \quad \forall i \in M, \quad \forall p \in T. \quad (7)$$

Запас топливной щепы на следующий день ($p+1$) определяется как разность между объемом топливной щепы, который есть в котельном пункте i в данный день p , и потреблением щепы в этот день p . Объем топливной щепы, который есть в котельном пункте i в день p , определяется как сумма запаса топливной щепы на день p и объема произведенной топливной щепы для котельного пункта i в день p :

$$W_{i,(p+1)} = W_{i,p} + X_{i,p} - V_{i,p}, \quad \forall i \in M, \quad \forall p \in T. \quad (8)$$

Запас топливной щепы в каждом котельном пункте в каждый день должен быть не больше максимального запаса топливной щепы в соответствующем котельном пункте в соответствующий день:

$$W_{i,p} \leq V_{i,p}^{//}, \quad \forall i \in M, \quad \forall p \in T. \quad (9)$$

Запас топливной щепы в каждом котельном пункте (пункте i) каждый день (в день p) должен быть не отрицателен:

$$W_{i,p} \geq 0, \quad \forall i \in M, \quad \forall p \in T. \quad (10)$$

Определим целевую функцию:

$$\sum_{j \in N} \sum_{k \in M} \sum_{i \in M} \left(A_{i,k,j} \cdot \sum_{p \in T} Z_{ikpj} \right) \rightarrow \min, \quad (11)$$

В данной задаче будем минимизировать стоимость на перемещение между котельными пунктами. Сначала определяем, перемещалась ли передвижная установка от котельного пункта i в котельный пункт k – суммируем индикатор наличия перемещения по всем дням. Если перемещение было, то $\sum_{p \in T} Z_{ikpj} = 1$, иначе $\sum_{p \in T} Z_{ikpj} = 0$. Затем суммируем произведение стоимости перемещения на индикатор перемещения по котельным пунктам-источникам, далее суммируем по котельным пунктам-приемникам, далее суммируем по всем передвижным установкам.

Результаты исследования. Перечислим достоинства данной математической модели.

1. Математическая модель предназначена для определения графика движения передвижных рубительных установок в течение подготовки к отопительному сезону (август) и самого отопительного сезона (сентябрь – май);
2. Математическая модель учитывает стоимость на передвижение между котельными пунктами рубительной установки;
3. Математическая модель приспособлена для определения запасов топливной щепы в котельных пунктах;
4. Математическая модель учитывает производительность рубительных установок;
5. Математическая модель приспособлена для отображения того, в каком пункте и в какой день находится каждая из работающих передвижных установок. Эта информация необходима для заблаговременного уведомления руководства котельных пунктов о приезде установок для производства топливной щепы. Таким образом, руководство котельных пунктов будет знать, к какому периоду необходимо обеспечить поставку дров для их последующей рубки на щепу.

Некоторые упрощения данной математической модели: математическая модель явно не предусматривает время, отведенное на плановые профилактические ремонты. Однако в графике движения установок по котельным пунктам определяются дни простоев (за счет создания запасов топливной щепы в котельных пунктах). День простоя – это день, для которого производимое количество топливной щепы равно 0. В дни простоев может быть произведен плановый ремонт рубительных установок (причем при планировании графика движения дни простоев будут определены заранее, что позволит спланировать мероприятия по ремонту).

Рассмотрим пример:

пусть дано 2 передвижные установки, $|N|=2$;

4 котельных пункта, $|M|=4$;

период планирования – 3 дня, $|T|=3$.

Пусть у нас первая передвижная установка (УСТАНОВКА 1) имеет такой маршрут – едет:

- 1 день – из первого пункта в третий,
- 2 день – из третьего пункта во второй,
- 3 день – из второго пункта во второй (т.е. не уезжает).

Вторая установка (УСТАНОВКА 2) имеет такой маршрут движения:

- 1 день – из второго пункта в четвертый,
- 2 день – из четвертого пункта в четвертый (т.е. не уезжает),
- 3 день – из четвертого пункта в первый.

Тогда определим значение переменной $Z_{ikpj} \quad \forall i \in M, \quad \forall k \in M, \quad \forall p \in T, \quad \forall j \in N$ модели. На рис. 1 указаны значения переменной Z_{ikpj} (значения $Z_{ikpj} = 0$ опущены).

		УСТАНОВКА 1					УСТАНОВКА 2					
К.-приемник К.-источник	ДЕНЬ	1	2	3	4	ДЕНЬ	1	2	3	4		
	1			1		1					1	
1	2					2				1	2	
2											3	
3											4	
4												
1	3					3					1	
2											2	
3			1								3	
4										1	4	
1	4					4					1	
2			1								2	
3											3	
4							1				4	

Рис. 1. Индикаторы перемещения установок между котельными пунктами

Fig. 1. Indicators for the movement of installations between boiler stations

Обсуждение. Приведенная в статье математическая модель предметной области учитывает наиболее значимые для практической реализации

факторы, влияющие на составление плана работы передвижной рубительной установки.

Математическая модель отличается простотой, она ближе к практике. Полученный в результате расчетов план может быть эффективно реализован на практике. В данном случае предметная область достаточно сложная, существует множество трудно формализуемых факторов, таких как температурный режим погоды, смены работы рабочих и установки, наличие древесного сырья в котельных пунктах для переработки, которые трудно учесть в модели. Однако эти факторы оказывают большое влияние на реализацию планируемого решения задачи.

В данной статье предложен вариант решения задачи в виде составления долгосрочного плана движения нескольких установок, показывающий в целом осуществление заготовок топливной щепы на период с момента планирования и до конца отопительного сезона. Далее полученный план можно корректировать в соответствии с практикой. При долгосрочном планировании нет необходимости составлять точный план на целый сезон, так как чем больше период планирования, тем труднее полученный план точно реализовать на практике.

Основным результатом статьи является возможность планирования работы передвижных установок в течение минимального количества циклов, необходимого для обеспечения всех котельных пунктов достаточным количеством топлива. При этом на каждом следующем цикле работы установки учитываются результаты предыдущих циклов работы. Планирование осуществляется с учетом того, что запаса топлива в котельном пункте должно хватить до следующего приезда установки в следующем цикле работы. Суммарная длина всех циклов работы установки может быть задана.

В модели учитываются начальные запасы топливной щепы в каждом котельном пункте перед началом работы установки. Поэтому полученный план в ходе реализации может в любое время быть уточнен в соответствии с практикой, дополнен оперативными данными.

Закключение. Топливая щепа является более экологичным видом топлива по сравнению с углем и мазутом. При ее сжигании выделяется небольшое количество углекислого газа. Переход на биотопливо предпочтителен для регионов, где осуществляется добыча леса и соответственно производится много отходов лесопереработки, которые необходимо рационально использовать, например, для отопления лесных поселков, лесоперерабатывающих предприятий и близлежащих населенных пунктов.

В статье приведено описание задачи составления оптимального согласованного плана движения нескольких щепорубительных установок между котельными пунктами и заготовки топливной щепы к отопительному сезону.

Составлена математическая модель предметной области, предназначенная для долгосрочного планирования работы передвижных установок на весь отопительный сезон. Модель учитывает производительность установок, запасы топлива в котельных пунктах и расстояние между пунктами. Приведен пример работы двух передвижных установок для обслуживания четырех котельных пунктов.

Внедрение полученных математических моделей на практике позволит регионам перейти на местные виды топлива и тем самым уменьшить стоимость тепловой энергии, и при этом решить проблему переработки древесных отходов.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Булатов А.Ф. и др. Оптимизация в планировании и управлении предприятиями регионального лесопромышленного комплекса. Петрозаводск: ПетрГУ, 2001. 217 с.

Васильев С.Б. Техника и технология производства щепы в леспромпхозе. Петрозаводск: ПетрГУ, 2001. 97 с.

Герасимов Ю.Ю., Соколов А.П., Сюнёв В.С. Optimization of industrial and fuel wood supply chain associated with cut-to-length harvesting // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 3(11). С. 118–124.

Суханов Ю.В. Система моделирования лесозаготовок с учетом потребностей биоэнергетики // Вестник Московского государственного университета леса «Лесной Вестник». 2013. № 1. С. 152–157.

Суханов Ю.В., Герасимов Ю.Ю., Селиверстов А.А., Соколов А.П. Технологические цепочки и системы машин для сбора и переработки древесной биомассы в топливную щепу при сплошнолесосечной заготовке в сортиментах // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 4. С. 101–107.

Шегельман И.Р., Шукин П.О., Морозов М.Н. Место биоэнергетики в топливно-энергетическом балансе лесопромышленного региона // Наука и бизнес: пути развития. 2011. № 6. С. 151–154.

Шукин П.О., Шегельман И.Р., Морозов М.А. Ресурсные вызовы в области региональной биоэнергетики и пути их преодоления // Инженерный вестник Дона. 2012. Т. 20. № 2.

Щеголева Л.В. Задача построения графика работы нескольких передвижных установок // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Биологические науки. 2010. № 8 (113). С. 93–98.

Щеголева Л.В. Метод оптимизации технологической схемы лесопромышленного производства с использованием вторичных ресурсов // Resources and Technology. 2005. № 5. С. 150–152.

Щеголева Л.В. Методика формирования технологических цепочек, включающих производство щепы энергетического назначения // Resources and Technology. 2010. Т. 8. С. 169–171.

Gerasimov Y., Karjalainen T. Energy wood resources availability and delivery cost in Northwest Russia // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2013. Vol. 28, no. 7. P. 689–700.

Gerasimov Y., Karjalainen T. Energy wood resources in Northwest Russia // *Biomass and Bioenergy*. 2011. No. 35. P. 1655–1662.

Laitila J., Väättäin K. Truck transportation and chipping productivity of whole trees and delimbed energy wood in Finland // *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2012. No. 33(2). P. 199–210.

Voronova A., Kunickaya O., Burmistrova D., Storodubtseva T., Chzhan S., Nikiforova V., Shvetsova V., Kalita E. Mobile Chipper scheduling in the production of fuel chips // *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. 2022. Vol. 9, no. 2, P. 425–430.

References

Bulatov A.F. et al. Optimization in planning and management of enterprises of the regional timber industry. Petrozavodsk: PetrSU, 2001. 217 p. (In Russ.)

Gerasimov Yu., Karjalainen T. Availability of energy wood resources and delivery costs in the North-West of Russia. *Scandinavian Journal of Forestry Research*, 2013, vol. 28, no. 7, pp. 689–700.

Gerasimov Yu., Karjalainen T. Energy resources of wood in the North-West of Russia. *Biomass and Bioenergy*, 2011, no. 35, pp. 1655–1662.

Gerasimov Yu.Yu., Sokolov A.P., Syunyov V.S. Optimization of the supply chain of business and fuel wood for cut-to-length harvesting. *Systems. Methods. Technologies*, 2011, no. 3(11), pp. 118–124. (In Russ.)

Laitila J., Väättäin K. Freight transport and chipping performance of whole trees and delimbed fuelwood in Finland. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2012, no. 33(2), pp. 199–210.

Shchegoleva L.V. Methodology for the formation of technological chains, including the production of wood chips for energy purposes. *Resources and Technology*, 2010, vol. 8, pp. 169–171. (In Russ.)

Shchegoleva L.V. The method of alternative technological scheme of timber industry with the use of secondary resources. *Resources and Technology*, 2005, no. 5, pp. 150–152. (In Russ.)

Shchegoleva L.V. The task of constructing a schedule for the operation of several mobile units. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Biological Sciences*, 2010, no. 8 (113), pp. 93–98. (In Russ.)

Shegelman I.R., Schukin P.O., Morozov M.N. The place of bioenergy in the fuel and energy balance of the timber industry region. *Science and business: ways of development*, 2011, no. 6, pp. 151–154. (In Russ.)

Shukin P.O., Shegelman I.R., Morozov M.A. Resource challenges in the field of bioenergetics and ways to solve them. *Inzhenerny Bulletin of the Don*, 2012, vol. 20, no. 2. (In Russ.)

Sukhanov Yu.V. The system for assessing logging taking into account bioenergy. *Bulletin of the Moscow University of Forests «Forest Bulletin»*, 2013, no. 1, pp. 152–157. (In Russ.)

Sukhanov Yu.V., Gerasimov Yu.Yu., Seliverstov A.A., Sokolov A.P. Technological chains and systems of machines for the collection and processing of wood biomass into fuel chips during clear-cutting harvesting in assortments. *Systems. Methods. Technologies*, 2011, no. 4, pp. 101–107. (In Russ.)

Vasiliev S.B. Equipment and technology for the production of wood chips in the timber industry. Petrozavodsk: PetrSU, 2001. 97 p. (In Russ.)

Voronova A., Kunitskaya O., Burmistrova D., Storodubtseva T., Zhang S., Nikiforova V., Shvetsova V., Kalita E. Planning a mobile chipper in the production of fuel chips. *Mathematical modeling of engineering problems*, 2022. vol. 9, no. 2, pp. 425–430.

Материал поступил в редакцию 20.06.2023

Воронова А.М. Оптимальное планирование работы комплекса установок для производства топливной щепы // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 247. С. 240–251. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.247.240-251

В статье рассматривается проблема использования отходов лесозаготовительной отрасли для производства топливной щепы. Топливная щепа по сравнению с углем и мазутом является более экологичным видом топлива. При ее сжигании выделяется небольшое количество углекислого газа. Переход на топливную щепу предпочтителен для регионов, где осуществляется добыча леса и имеется много отходов лесопереработки, которые необходимо рационально использовать, например, для отопления лесных поселков, лесоперерабатывающих предприятий и близлежащих населенных пунктов. Для этого необходимо решать задачу своевременной подготовки топливной щепы в тех пунктах, где она в дальнейшем будет использоваться для отопления. В статье приведена математическая модель транспортной задачи составления согласованного графика движения нескольких передвижных рубильных установок между котельными пунктами с учетом производительности установок и потребностей обслуживаемых пунктов. Математическая модель предназначена для долгосрочного планирования работы передвижных установок на весь отопительный сезон с сентября по май и период подготовки к отопительному сезону (август) – время, в течение которого рубильные машины посетят все котельные пункты столько раз, сколько это необходимо согласно потребностям котельных пунктов. Модель учитывает производительность установок, запасы топлива в котельных пунктах и расстояние между пунктами. Приведен пример работы двух передвижных установок для обслуживания четырех котельных пунктов. Внедрение полученных математических моделей на практике позволит регионам перейти на местные виды топлива и тем самым уменьшить стоимость тепловой энергии, и при этом решить проблему переработки древесных отходов.

Ключевые слова: щепа, щепорубильная установка, математическая модель, оптимизация, переработка отходов, отопление, экологичное топливо.

Voronova A.M. Optimal planning of the operation of a complex of wood chippers for the production of fuel chips. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 247, pp. 240–251 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.247.240-251

The article deals with the problem of using logging residues of the logging industry for the production of fuel chips. Fuel chips are a more environmentally friendly type of fuel compared to coal and fuel oil. When it is burned, a small amount of carbon dioxide is released. Switching to fuel chips is preferable for regions where timber is harvested and there is a lot of logging waste that needs to be rationally used, for example, for heating forest villages, timber processing enterprises and nearby settlements. To do this, it is necessary to solve the problem of timely preparation of fuel chips at those points where it will be used for heating in the future. The article presents a mathematical model of the transport task of compiling an agreed schedule for the movement of several mobile chipping plants between boiler stations, taking into account the performance of the plants and the needs of the serviced points. The mathematical model is intended for long-term planning of the operation of mobile units for the entire heating season from September to May and the period of preparation for the heating season (August) – the time during which the chippers will visit all boiler stations as many times as necessary according to the needs of boiler stations. The model takes into account the productivity of installations, fuel reserves in boiler points and the distance between points. An example of the operation of two mobile units for servicing four boiler stations is given. The implementation of the obtained mathematical models in practice will allow the regions to switch to local fuels, and thereby reduce the cost of thermal energy and at the same time solve the problem of processing wood waste.

Keywords: wood chips, wood chipper, mathematical model, optimization, waste processing, heating, eco-friendly fuel.

ВОРОНОВА Анна Михайловна – доцент кафедры прикладной математики и кибернетики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Петрозаводский государственный университет», кандидат технических наук. SPIN-код: 4655-1975. ORCID: 0009-0004-9567-6421.

185910, пр. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия. E-mail: voronova_am@petrsu.ru

VORONOVA Anna M. – PhD (Technical), Associate Professor of Department of Applied Mathematics and Cybernetics of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Petrozavodsk State University». SPIN-код: 4655-1975. ORCID: 0009-0004-9567-6421.

185910, Lenina av. 33. Republic of Karelia. Petrozavodsk. Russia. E-mail: voronova_am@petrsu.ru