

Г.К. Мотовилов, Л.Я. Громская, Н.А. Тюрин, Т.С. Антонова

**МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ
РЕГИОНАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ
ПЕЛЛЕТНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Введение. Проблема территориального размещения пеллетных производств в заданном регионе связана с поиском лучших географических точек месторасположения пеллетных заводов. Решения по их размещению чрезвычайно важны, поскольку они влияют на показатели деятельности организации в течение многих лет, имеют долгосрочный характер. Если организация совершит ошибку и построит завод в неудачном месте, вложив в него значительные средства, то исправить ситуацию, переехав на новое место будет не так просто, поскольку это потребует больших финансовых, трудовых, временных затрат; приведет к потере клиентов, замораживанию капиталов, снижению конкурентоспособности. Удачное месторасположение само по себе еще не гарантирует успеха в бизнесе, но является его необходимым условием. В настоящее время отсутствуют комплексные научные методики проектирования территориального размещения производств по переработке древесных отходов. Предлагаемая методика основана на картографическом моделировании и оптимизации транспортных процессов доставки сырья для производства пеллет на базе геоинформационных технологий [Салминен, 2021; Тюрин и др., 2016].

Цель и задача исследования. Оптимизация территориального размещения новых пеллетных производств в заданном районе по критерию минимума транспортных расходов на их сырьевое обеспечение.

Рассмотрим математическую постановку и решение задачи оптимального размещения в регионе новых пеллетных производств заданной стандартной мощности для полного использования сырьевых ресурсов региона.

Пусть в регионе имеется некоторая совокупность (n) пунктов источников древесного сырья пеллетного производства с известными координатами их размещения и объемами запасов Q_i . Пусть уже имеется так же в регионе некоторое количество (m) заводов пеллетного производства с известными мощностями M_j . Необходимо определить оптимальное географическое местоположение новых пеллетных производств заданной

стандартной мощности, обеспечивающих полное использование древесного сырья, с учетом существующей транспортной инфраструктуры, по критерию минимума грузовой работы доставки сырья. При этом требуется соблюдения условие – местоположение новых предприятий должно быть в населенных пунктах, а существующие пеллетные производства полностью обеспечены сырьем на их проектную мощность.

Математическая модель и алгоритм поиска местоположения новых пеллетных производств в заданном районе. Предлагаемая методика обоснования местоположения новых пеллетных производств в заданном регионе, на базе геоинформационных технологий, состоит из следующей последовательности шагов.

1. Вначале решается задача оптимального распределения сырьевых источников региона на существующие пеллетные производства, для которых известны координаты их размещения (x_j, y_j) и мощности производства M_j . Для каждого j -го существующего предприятия решается задача оптимизации поставки сырья из i -го источника q_{ij} по критерию минимума транспортной работы доставки сырья.

Целевая функция распределения сырьевых источников по существующим пеллетным производствам в регионе имеет следующий вид:

$$R = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n q_{ij} \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} = \min. \quad (1)$$

С ограничениями:

$$\sum_{i=1}^n \frac{q_{ij}}{v_i} = M_j, \quad j = 1, 2, \dots, m; \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^m q_{ij} \leq Q_i, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (3)$$

$$q_{ij} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

где R – транспортная работа по доставке сырья на существующие в регионе предприятия, $\text{м}^3 \text{ км/год}$; q_{ij} – объем поставки сырья из i -го источника в пункт размещения j -го предприятия, м^3 ; m – количество существующих пеллетных производств в регионе, n – количество сырьевых источников в регионе; x_i, y_i – координаты центра запаса i -го источника; M_j – мощность j -го пеллетного производства по выпуску готовой продукции, т/год ; v_i – коэффициент выхода готовой продукции по сырью i -го источника, $\text{м}^3/\text{т}$; Q_i – возможный объем поставки сырья i -го источника, м^3 .

Целевая функция (1) определяет совокупную грузовую работу на транспортировку сырья на существующие пеллетные производства. Выражения (2) и (3) определяют баланс между требуемым объемом сырья и наличием его запасов в пунктах его сбора. Ограничение (4) отражает условие не отрицательности объемов поставок сырья.

2. После оптимального распределения сырьевых источников региона на существующие пеллетные производства, проводится корректировка оставшихся объемов источников сырья

$$Q_i = Q_i - \sum_j q_{ij}, \quad i = 1, 2 \dots n, j = 1, 2 \dots m. \quad (5)$$

3. Для размещения нового пеллетного производства необходимо, в начале найти опорные оптимальные координаты его местоположения в регионе x^c, y^c по критерию минимума грузовой работы доставки сырья из оставшихся источников с известными координатами x_i, y_i .

$$R = \sum_{i=1}^n q_i \sqrt{(x^c - x_i)^2 + (y^c - y_i)^2} = \min. \quad (6)$$

С ограничениями:

$$\sum_{i=1}^n \frac{q_i}{v_i} = M, \quad i = 1, 2 \dots n, \quad (7)$$

$$q_i \leq Q_i, \quad i = 1, 2 \dots n; \quad (8)$$

$$q_i \geq 0, \quad i = 1, 2 \dots n, \quad (9)$$

где R – транспортная работа по доставке сырья на предприятие, $\text{м}^3 \text{ км/год}$; q_i – объем поставки сырья из i -го источника в пункт размещения предприятия, м^3 ; n – количество сырьевых источников в регионе; x_i, y_i – координаты центра тяжести запасов i -го источника; M – мощность пеллетного производства по выпуску готовой продукции, т/год ; v_i – коэффициент выхода готовой продукции по сырью i -го источника, $\text{м}^3/\text{т}$; Q_i – возможный объем поставки сырья i -го источника после корректировки (5), м^3 .

Полученные координаты x^c, y^c позволяют получить опорное, начальное решение задачи оптимального размещения нового пеллетного производства в регионе. Основной недостаток полученного решения – отсутствие учета существующей в регионе транспортной инфраструктуры.

4. Для учета транспортной инфраструктуры региона, полученные координаты нового пеллетного производства x^c, y^c нанести на карту и рассчитать коэффициенты удлинения k_i транспортировки сырья от центров их

запасов x_i, y_i до опорного решения x^c, y^c размещения нового предприятия по формуле

$$k_i = \frac{l_i^u}{l_i^v}, \quad (10)$$

где l_i^u – расстояние транспортировки сырья от i -го источника до местоположения пеллетного производства x^c, y^c по существующей транспортной сети, км; l_i^v – воздушное расстояние от центра тяжести запасов i -го источника до опорного решения x^c, y^c .

При отсутствии существующих транспортных путей от отдельных источников сырья до нового пеллетного производства, коэффициент удлинения принимается сколь угодно большим наперед заданным числом, например, 9999.

5. Уточняем координаты оптимального положения нового пеллетного завода x^o, y^o с учетом наличия дорог по критерию минимума транспортной работы доставки сырья по следующей целевой функции:

$$R = \sum_{i=1}^n k_i q_i \sqrt{(x^o - x_i)^2 + (y^o - y_i)^2} = \min. \quad (11)$$

С прежними ограничениями (7), (8), (9).

Полученное новое решение координат размещения предприятия уже будет учитывать существующую транспортную инфраструктуру, но не учитывает некоторые социальные и экономические возможности строительства завода в точке с координатами x^o, y^o (отсутствие населенных пунктов, подводки тепла и энергии, наличие рабочей силы). Для учета этих факторов приступаем к следующему этапу алгоритма поиска оптимального размещения предприятия.

6. С помощью инструментов геоанализа (буферизация) находим ближайшие к точке с координатами x^o, y^o населенные пункты, удовлетворяющие требованиям возможности строительства в них пеллетного производства и замеряем в гис-проекте их координаты $x_k, y_k, k = 1 \dots s$. Найденные координаты будут перспективными вариантами на размещения в них нового пеллетного производства. Для определения оптимального из них переходим к седьмому этапу алгоритма.

7. Для каждого k -го варианта размещения предприятия $k = 1 \dots s$ решается задача оптимизации поставки сырья из i -го источника q_{ik} по критерию минимума транспортной работы. Целевая функция:

$$R_k = \sum_{i=1}^n k_{ik} q_{ik} \sqrt[2]{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2} = \min. \quad (12)$$

Ограничения:

$$\sum_{i=1}^n \frac{q_{ik}}{v_i} = M, i = 1, 2 \dots n, k = 1, 2 \dots s; \quad (13)$$

$$q_{ik} \leq Q_i, i = 1, 2 \dots n, k = 1, 2 \dots s; \quad (14)$$

$$Q_{ik} \geq 0, i = 1, 2 \dots n, k = 1, 2 \dots s, \quad (15)$$

где R_k – оптимальная транспортная работа по доставке сырья k -го варианта размещения предприятия, $\text{м}^3 \text{ км}$; q_{ik} – объем поставки сырья из i -го источника в k пункт размещения предприятия, м^3 ; k_{ik} – коэффициент удлинения перевозки сырья из i -го источника на k -й вариант размещения предприятия с учетом транспортной инфраструктуры (10).

Окончательный вариант территориального размещения предприятия выбирают по критерию минимума транспортной работы R_k из s рассмотренных вариантов.

8. Проводится корректировка оставшихся объемов источников сырья в регионе после оптимизации распределения на новый пеллетный завод по формуле (5) и решается задача оптимального размещения еще одного нового пеллетного производства в соответствии с пунктами 3...7 предлагаемого алгоритма. Процесс размещения очередного нового завода пеллетного производства повторяется, пока не будет обеспечена проектная мощность очередного завода остатками сырья в источниках региона после корректировки (5).

Задача оптимального месторасположения завода по производству пеллет на основании предлагаемой математической модели и эвристического алгоритма может быть решена с использованием геоинформационных систем и метода нелинейного программирования в надстройке MS Excel «Поиск решения».

Апробация предлагаемой методики выполнена на примере разработки региональной структуры пеллетного производства Новгородской области. Использовались данные лесного плана Новгородской области № 580 от 15.10.2020. (URL: <http://leskom.nov.ru> (дата обращения: 01.03.22) [филиал ФГБУ «Рослесинфорг» «Севзаплеспроект», 2020] и гис-проект транспортной инфраструктуры, лесных ресурсов и лесопромышленного производства области в среде MapInfo. Рассматривалось три сценария развития пел-

Оптимизация размещения Пеллетного пр-ва						
Координаты пеллетного производства		Целевая функция		Кудл	Ср раст вив, км	
x=	6434086,87	y=	6551188,448	7783438,656	31,13	
Мощность завода по выпуску пеллет тыс		100				
Координаты центров запасов отходов		Используемые балансов и отходы, тыс м куб			Коэфф. Выгода м куб/т	Выход готовой продукции, Тис. Тонн
Чудовское	6434089,18	6551190,24	98,40	1,69	2,50	39,36
Маловишерское	6467246,34	6521653,63	116,17	1	2,50	46,47
Любитинское	6520601,30	6542670,25	0,00	1,78	2,50	0,00
Хвойнинское	6590257,36	6536994,71	0,00	1,35	2,50	0,00
Пестовское	6625762,59	6501696,15	0,00	1,67	2,50	0,00
Холмское	6394653,61	6336019,79	0,00	1,49	2,50	0,00
Новгородское	6406514,41	6505584,17	35,43	1,39	2,50	14,17
Валдайское	6489509,08	6427635,53	0,00	2,08	2,50	0,00
Маревское	6449688,25	6356530,80	0,00	1,67	2,50	0,00
Демьянское	6467821,69	6403643,95	0,00	2,14	2,50	0,00
Шимское	6343399,77	6461927,69	0,00	1,56	2,50	0,00
Крестецкое	6466196,27	6463521,85	0,00	2,23	2,50	0,00
Окуловское	6508524,11	6477331,99	0,00	2,18	2,50	0,00
Боровичское	6563545,38	6481423,01	0,00	1,46	2,50	0,00
Мошенское	6601146,43	6485459,93	0,00	1,41	2,50	0,00
Поддорское	6385090,56	6374260,15	0,00	1,44	2,50	0,00
Старорусское	6404829,43	6410228,83	0,00	1,59	2,50	0,00
Парфинское	6431720,29	6427893,46	0,00	1,55	2,50	0,00

Рис. 2. Определение координат производства с учетом существующей транспортной инфраструктуры

Fig.2. Determination of production coordinates, taking into account existing transport infrastructure

Результаты промежуточных расчетов выбора оптимального местоположения пеллетного производства по второму сценарию (п. 6 алгоритма) для пятого завода мощностью 150 тыс. т, с учетом ближайших к оптимальной точке населенных пунктов, приведены на рис. 3.

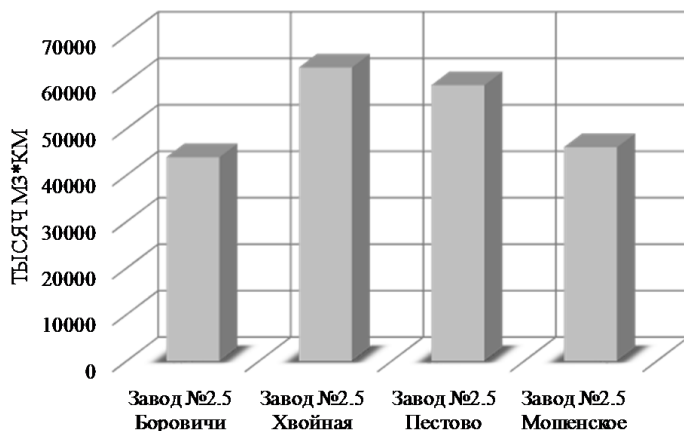


Рис. 3. Сравнительный график грузовой работы доставки сырья второй сценарий, пятый завод

Fig. 3. Comparative freight schedule for raw material delivery scenario two, plant five

График грузовой работы доставки сырья на новый пеллетный завод по рассмотренным четырем вариантам (п.7 алгоритма) позволил рекомендовать его строительство в окрестностях г. Боровичи.

Выполненные расчеты по предлагаемой методике территориального размещения пеллетных заводов области по рассмотренным сценариям позволили получить следующие результаты.

Для полного использования древесных отходов всей расчетной лесосеки Новгородской области с учетом уже существующих пеллетных производств, требуется построить 8 заводов единичной проектной мощностью 100 тыс. т/год (первый сценарий). Заводы следует разместить в окрестностях следующих населенных пунктов: Чудово, Неболчи, Любытино, Пестово, Крестцы, Демянск, Старая Русса и Сольцы. По второму сценарию для единичной проектной мощности новых заводов в 150 тыс. т/год для полного использования всех отходов расчетной лесосеки области требуется построить 5 заводов в населенных пунктах Малая Вишера, Боровичи, Поддорье, Любытино и Крестцы.

Совпадение рекомендуемых новых пеллетных заводов с местоположением существующих пеллетных производств в Неболчах, Малой Вишере, Боровичах, Пестово и Демянске указывает на рациональное размещение уже существующих пеллетных производств в области и возможности дальнейшего увеличения их мощности производства.

При полном использовании всех древесных отходов от достигнутых в 2020 г. объемов лесозаготовок в Новгородской области (третий сценарий) потребуются строительство лишь одного завода мощностью 150 тыс. тонн в окрестностях Малой Вишеры.

Следует отметить, что принятие окончательного решения по размещению региональной инфраструктуры пеллетного производства конечно, должно учитывать не только грузовую работу доставки сырья, но и другие критерии, такие как экономические, экологические и социальные.

Выводы. При достигнутых объемах заготовки и существующих резервах сырьевых источников Новгородской области рекомендуется строительство одного завода по производству пеллет мощностью 150 тыс. т. в г. Малая Вишера.

При перспективных объемах заготовки в Новгородской области, равной расчетной лесосеке и стандартной мощности пеллетных производств 100 тыс. т в год рекомендуется к реализации первый сценарий – строительство 8 заводов в следующих населенных пунктах: Чудово, Неболчи, Любытино, Пестово, Крестцы, Демянск, Старая Русса и Сольцы.

Существующие пеллетные производства, кроме расположенного в п. Марево, перспективны для расширения имеющихся мощностей пеллетного производства по сырьевому обеспечению.

Выполненные машинные эксперименты подтвердили достоверность предложенной методики, которая может быть рекомендована для оптимизации территориального размещения региональной инфраструктуры пеллетных производств по критерию минимума транспортной работы доставки сырья.

Библиографический список

Салминен Э.О., Борозна А.А., Тюрин Н.А. Лесопромышленная логистика: учебник. СПб.: Лань, 2021. 352 с.

Тюрин Н.А., Салминен Э.О., Громская Л.Я., Антонова Т.С. Геоинформатика на промышленном транспорте: учебное пособие. СПб.: СПбГЛТУ, 2016. 104 с.

Reference

Salminen E.O., Borozna A.A., Tyurin N.A. Timber industry logistics: textbook. St. Petersburg: Lan, 2021. 352 p. (In Russ.)

Tyurin N.A., Salminen E.O., Gromskaya L.Ya., Antonova T.S. Geoinformatics in industrial transport: a textbook. St. Petersburg: SPbGLTU, 2016. 104 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 24.05.2022

Мотовилов Г.К., Громская Л.Я., Тюрин Н.А., Антонова Т.С. Методика обоснования региональной инфраструктуры пеллетного производства // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 241. С. 196–206. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.241.196-206

Объектом исследования является методика определения оптимального местонахождения пеллетных производств. Цель работы – оптимизация территориального размещения новых пеллетных производств в заданном районе по критерию минимума транспортных расходов на их сырьевое обеспечение. В результате исследований разработаны математическая модель и алгоритм поиска оптимального местоположения комбината по критерию грузовой работы доставки сырья с учетом существующей транспортной инфраструктуры области и расчетных лесосек лесничеств. Реализация поставленной оптимизационной задачи размещения пеллетных производств осуществлена в среде MS EXCEL с помощью подсистемы «Поиск решения» и ГИС-проекта лесосырьевой базы Новгородской области. Значимость работы заключается в разработке математической модели и алгоритма оптимизации территориального размещения пеллетных производств. При достигнутых объемах заготовки и существующих

резервах сырьевых источников Новгородской области рекомендуется строительство одного завода по производству пеллет мощностью 150 тыс. т в г. Малая Вишера. При перспективных объемах заготовки в Новгородской области равной расчетной лесосеке и стандартной мощности пеллетных производств 100 тыс. т в год рекомендуется к реализации первый сценарий – строительство 8 заводов в следующих населенных пунктах: Чудово, Неблочи, Любытино, Пестово, Крестцы, Демянск, Старая Русса и Сольцы. Существующие пеллетные производства, кроме расположенного в п. Марёво, перспективны для расширения имеющихся мощностей пеллетного производства по сырьевому обеспечению.

Ключевые слова: грузовая работа, оптимизация местоположения пеллетного завода, сырьевые источники, транспортная инфраструктура, картографическое моделирование.

Motovilov G.K., Gromskaya L.Ya., Tyurin N.A., Antonova T.S. Methodology of justification of regional infrastructure of pellet production. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2022, iss. 241, pp. 196–206 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2022.241.196-206

The object of the research is the methodology of determining the optimal location of pellet production facilities. The purpose of work is optimization of territorial location of new pellet manufactures in the given area by a criterion of a minimum of transport expenses for their raw material maintenance. As a result of the research, a mathematical model and an algorithm for finding an optimum location of the mill by the criterion of the raw material delivery load, taking into account the existing transport infrastructure of the region and estimated logging areas of forestries were developed. The realization of the posed optimization task of pellet mill location is carried out in MS EXCEL environment with the help of "Search for solution" subsystem and GIS-project of forest raw material base of Novgorod region. Significance of work consists in development of mathematical model and algorithm of optimization of territorial location of pellet manufactures. With the achieved volumes of harvesting and existing reserves of raw material sources in Novgorod region it is recommended to build one plant for pellet production with a capacity of 150 thousand tons in the town of Malaya Vishera. With the prospective volumes of harvesting in the Novgorod region equal to the estimated logging area and standard pellet production capacity of 100 thousand tons per year it is recommended to implement the first scenario – the construction of 8 plants in the following settlements: Chudovo, Neblochi, Lubyтино, Pestovo, Krestsi, Demyansk, Staraya Russa and Soltsy. Existing pellet manufactures, except for located in settlement Marevo, are perspective for expansion of available capacities of pellet manufacture on raw materials supply.

Keywords : freight work, optimisation of pellet plant location, raw material sources, transport infrastructure, cartographic modelling.

МОТОВИЛОВ Глеб Константинович – студент кафедры промышленного транспорта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 1725-3427.

194021, Институтский пер., 5, корп. 1, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ziber71@gmail.com

MOTOVILOV Gleb K. – student in the industrial transport department St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN- code: 1725-3427.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: ziber71@gmail.com

ГРОМСКАЯ Любовь Яковлевна – доцент, заведующая кафедрой промышленного транспорта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 9636-3982.

194021, Институтский пер., 5, корп. 1, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: gromskaya.stl@gmail.com

GROMSKAYA Lubov Ya. – associate professor, head of the department of industrial transport, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN- code: 9636-3982.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: gromskaya.stl@gmail.com

ТЮРИН Николай Александрович – профессор кафедры промышленного транспорта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 8998-5234.

194021, Институтский пер., 5, корп. 1, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: tnalif@mail.ru

TYURIN Nikolay A. – professor in the industrial transport department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN- code: 8998-5234.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: tnalif@mail.ru

АНТОНОВА Татьяна Степановна – доцент кафедры промышленного транспорта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 4581-5931.

194021, Институтский пер., 5, корп. 1, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: antonova.stl@mail.ru

ANTONOVA Tatyana S. – associate professor in the industrial transport department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN- code: 4581-5931.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: antonova.stl@mail.ru