

УДК: 519.87

## Решение логистической задачи топливоснабжения распределенной региональной системы теплоснабжения

К. В. Кетова, Е. В. Трушкова<sup>а</sup>

Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова,  
факультет «Математика и естественные науки»,  
Россия, 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7

E-mail: <sup>а</sup> e.v.trushkova@gmail.com

Получено 26 марта 2012 г.,  
после доработки 16 мая 2012 г.

Предложена методика решения задачи логистики топливоснабжения региона, включающая в себя взаимосвязанные задачи маршрутизации, кластеризации, оптимального распределения ресурсов и управления запасами. Расчеты проведены на примере системы топливоснабжения Удмуртской Республики.

Ключевые слова: логистика, топливоснабжение, маршрутизация, кластеризация, оптимизация, управление запасами, генетический алгоритм

### The solution of the logistics task of fuel supply for the regional distributed heat supply system

K. V. Ketova, E. V. Trushkova

*Izhevsk State Technical University, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, 7 Studencheskaya street, Izhevsk, 426069, Russia*

**Abstract.** – The technique for solving the logistic task of fuel supply in the region, including the interconnected tasks of routing, clustering, optimal distribution of resources and stock control is proposed. The calculations have been carried out on the example of fuel supply system of the Udmurt Republic.

Keywords: logistics, fuel supply, routing, clustering, stock control, genetic algorithm

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2012, vol. 4, no. 2, pp. 451–470 (Russian).

## 1. Введение

Логистическое управление имеет важное значение при организации и планировании процессов в условиях внедрения инновационных технологий. Так, актуальная задача перехода на местные возобновляемые энергоресурсы, сформулированная в рамках ресурсосберегающей политики регионального топливоснабжения, решается на основе логистического подхода.

Рассматривается задача логистики топливоснабжения при переводе распределенной системы теплоснабжения региона на древесные виды топлива. Целесообразность их использования в качестве возобновляемых энергоресурсов для Удмуртской Республики (УР) определена в Концепции Республиканской целевой программы «Снабжение Удмуртской Республики местными видами топлива» [Русяк, Преснухин, Кетова, Королёв, Трушкова, 2010].

В качестве исходной информации для решения задачи логистики используется информация о местах расположения предприятий лесозаготовки и деревообработки, информация о населенных пунктах с теплоисточниками, которые планируется перевести с традиционных видов топлива (уголь, мазут, электроэнергия) на альтернативный вид топлива (древесная щепа).

Логистическая схема снабжения теплоисточников древесной щепой состоит из 4-х уровней (см. рис. 1). На предприятиях лесозаготовки и деревообработки образуется древесное сырье, которое свозится на пункты накопления сырья (ПНС), где проходят первичную механическую переработку. Первично переработанное древесное сырье направляется в пункты подготовки топлива (ППТ), где осуществляется сортировка, тепловая обработка и упаковка щепы. На последнем этапе щепа транспортируется до потребителей, которыми выступают теплоисточники региона. На всех уровнях логистической системы присутствуют склады для хранения сырья.

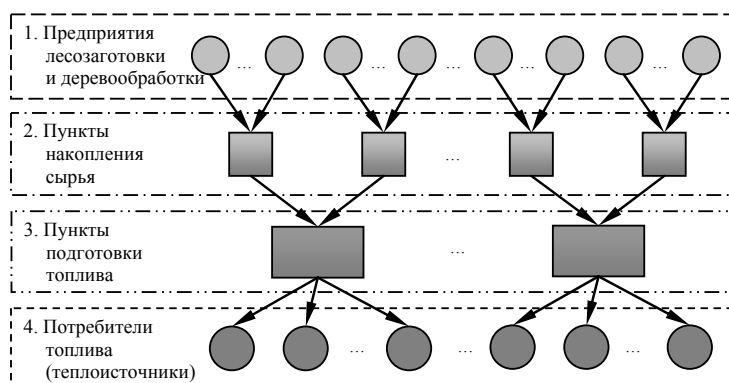


Рис. 1. Схема системы топливоснабжения

Решение задачи логистики топливоснабжения состоит из четырех этапов, на каждом из которых осуществляется решение определенных задач: маршрутизации, кластеризации, оптимального распределения ресурсов на районном и региональном уровнях, оптимального управления запасами.

## 2. Задача маршрутизации

### 2.1. Постановка задачи

Одним из этапов решения логистической задачи является определение оптимальных маршрутов перевозки топлива. В качестве критерия оптимизации рассматривается минимизация транспортных расходов, входящих в стоимость топлива.

Рассмотрим множество возможных маршрутов, соединяющих два произвольных узла пересечения дорог. Обозначим траекторию  $k$ -го маршрута от узла пересечения дорог  $g_1^k$  до узла

пересечения дорог  $g_{n_k}^k$  как  $M_{1n_k}^k = (g_1^k, g_2^k, \dots, g_{n_k-1}^k, g_{n_k}^k)$ , где  $g_i^k$  – узлы, последовательно входящие в  $k$ -й маршрут;  $i = \overline{1, n_k}$ , где  $n_k$  – количество узлов на  $k$ -м маршруте;  $k = \overline{1, N}$ , где  $N$  – количество маршрутов.

Введем матрицу транспортных затрат  $S^k = \{s(g_i^k, g_j^k)\}$ , где  $s(g_i^k, g_j^k)$  – транспортные затраты на перевозку одной тонны условного топлива (руб./т у.т.) от узла  $g_i^k$  до узла  $g_j^k$  ( $i, j = \{1, 2, \dots, n_k\}$ ).

Транспортные затраты зависят от типа покрытия дороги  $l$  (асфальт, грунт и др.).

**Допущение 1.** Будем предполагать, что между двумя смежными узлами тип дорожного покрытия не меняется.

Обозначим через  $c_{ij}^k$  удельный тариф стоимости перевозки одной тонны условного топлива по дороге  $l$ -го типа от узла  $g_i^k$  до узла  $g_j^k$ , руб./((км·т у.т.)). Тогда транспортные затраты на перевозку топлива от узла  $g_i^k$  до узла  $g_j^k$  определяются по формуле

$$s(g_i^k, g_j^k) = s_{ij}^k = c_{ij}^k d_{ij}^k, \quad (2.1)$$

где  $d_{ij}^k$  – расстояние перевозки топлива от узла  $g_i^k$  до узла  $g_j^k$  по  $k$ -му маршруту, км.

Удельный тариф на перевозку одной тонны условного топлива в общем случае определяются по формуле

$$c_{ij}^k = \frac{a + u_{ij} + w_{ij}}{G k_s}, \quad (2.2)$$

где  $a$  – амортизационные затраты автотранспорта, руб./км;  $u_{ij}$  – расходы на топливо, руб./км;  $w_{ij}$  – расходы на оплату труда рабочих, руб./км;  $G$  – грузоподъемность транспортного средства, т;  $k_s$  – калорийный эквивалент (отношение количества теплоты, выделяемой при сгорании единицы натурального топлива, к количеству теплоты, выделяемой при сгорании условного топлива), т у.т./т.

Транспортные затраты на перевозку топлива от узла  $g_1^k$  до узла  $g_{n_k}^k$  по  $k$ -му маршруту складываются из транспортных затрат на перевозку топлива по каждому участку дороги:

$$s(g_1^k, g_{n_k}^k) = s(g_1^k, g_2^k) + s(g_2^k, g_3^k) + \dots + s(g_{n_k-1}^k, g_{n_k}^k). \quad (2.3)$$

Задача маршрутизации заключается в поиске маршрута с минимальными транспортными затратами на перевозку 1 т у.т. от узла  $g_1^k$  до узла  $g_{n_k}^k$ :

$$s(g_1, g_n) = \min_k s(g_1^k, g_{n_k}^k). \quad (2.4)$$

## 2.2. Алгоритм решения задачи маршрутизации

Для решения задачи маршрутизации в системе топливоснабжения региона предложен комплексный алгоритм, состоящий из трех этапов:

- 1) нахождение первоначального (опорного) маршрута с помощью модифицированного алгоритма А\* (Астар);
- 2) получение на основе опорного маршрута множества допустимых маршрутов с помощью метода Йена;

3) поиск оптимального маршрута с помощью генетического алгоритма, адаптированного под задачу маршрутизации.

Алгоритм  $A^*$  позволяет определить маршрут с наименьшей стоимостью перевозки топлива от начального узла  $g_1^k$  до конечного  $g_{n_k}^k$ , где  $k$  – номер маршрута [Рассел, Норвиг, 2006].

Модификация алгоритма  $A^*$  заключается в увеличении его гибкости и вероятности попадания в глобальный минимум.

*Модифицированный алгоритм  $A^*$ :*

1. Формируется маршрут  $M_{1i}^k$ , состоящий из начального узла:

$$M_{1i}^k = (g_i^k), \quad i = 1. \quad (2.5)$$

2. Рассматриваются узлы  $j = \overline{1, n^{(i)}}$ , смежные с данным  $i$ -м узлом;  $n^{(i)}$  – количество узлов, смежных с  $i$ -м узлом. Для каждого из этих узлов определяется эвристическая функция:

$$f(M_{1j}^k) = \bar{s}(M_{1j}^k) + \bar{h}(M_{j n_k}^k), \quad (2.6)$$

где  $\bar{s}(M_{1j}^k)$  – оценка стоимости перевозки от начального узла  $g_1^k$  до рассматриваемого узла  $g_j^k$ ;  $\bar{h}(M_{j n_k}^k)$  – оценка расстояния от рассматриваемого узла  $g_j^k$  до конечного узла  $g_{n_k}^k$ , определяемые по формулам

$$\bar{s}(M_{1j}^k) = \sum_{i=1}^{j-1} d_{i(i+1)}^k c_{l_{i(i+1)}}^k, \quad (2.7)$$

$$\bar{h}(M_{m_k n_k}^k) = \tau \bar{c} r_{m_k n_k}^k, \quad (2.8)$$

где  $d_{i(i+1)}^k$  – длина дороги, соединяющей  $i$ -й и  $(i+1)$ -й узел  $k$ -го маршрута;  $c_{l_{i(i+1)}}^k$  – удельный тариф, представляющий собой стоимость перевозки одной тонны условного топлива на расстояние 1 км на промежутке от  $i$ -го до  $(i+1)$ -го узла  $k$ -го маршрута по дороге  $l$ -го типа;  $\tau$  – коэффициент кривизны дорог,  $\tau \geq 1$ ;  $\bar{c}$  – средний удельный тариф;  $r_{m_k n_k}^k$  – расстояние между рассматриваемым узлом  $g_j^k$  и конечным узлом  $g_{n_k}^k$ .

3. Для узлов, в которых на этапе 2 рассчитана функция  $f(M_{1j}^k)$ , определяется функция вероятности:

$$P(M_{ij}^k) = \frac{[f(M_{1i}^k) - f(M_{1j}^k)]^\lambda}{\sum_{j=1}^{n^{(i)}} [f(M_{1i}^k) - f(M_{1j}^k)]^\lambda}, \quad (2.9)$$

где  $\lambda$  – задаваемый параметр, определяющий форму влияния функции  $f(M_{1j}^k)$  на вероятностную функцию  $P(M_{ij}^k)$ ,  $0 < \lambda < \infty$ .

4. Далее генерируется случайным образом равномерно распределенная величина  $\xi \in [0, 1]$ . Среди всех узлов выбирается тот, вероятность (2.9) попадания в который наиболее близка к генерированной случайной величине. Эта процедура проводится для того, чтобы увеличить вероятность попадания в глобальный минимум. Найденный узел добавляется в маршрут:

$$M_{1i}^k = (g_1^k, \dots, g_i^k, g_{i+1}^k). \quad (2.10)$$

5. Проверяется условие окончания работы алгоритма – условие попадания в конечный узел:  $i = n_k$ . Если условие выполняется, то маршрут от начального узла  $g_1^k$  до конечного узла  $g_{n_k}^k$  считается найденным. Иначе осуществляется переход к этапу 2.

В результате реализации модифицированного алгоритма  $A^*$  определяется опорный маршрут. Далее с помощью метода Йена строится множество допустимых маршрутов.

*Алгоритм метода Йена:*

1. Задается первоначальный маршрут, определенный с помощью модифицированного алгоритма  $A^*$ :

$$M_{1n_k}^k = (g_1^k, g_2^k, \dots, g_{n_k}^k), \quad k = 1, \quad i = 1. \quad (2.11)$$

2. Из маршрута  $M_{1n_k}^k$  исключается ребро  $(g_i^k, g_{i+1}^k)$ . Далее, с использованием узлов, не входящих в  $k$ -й маршрут, с помощью модифицированного алгоритма  $A^*$  находятся новые маршруты:

$$M_{1n_j}^j = (g_1^j, g_2^j, \dots, g_{n_j}^j), \quad j = \overline{1, n^{(i)}}, \quad (2.12)$$

где  $j = \overline{1, n^{(i)}}$  – номера построенных маршрутов;  $n^{(i)}$  – количество построенных маршрутов.

3. Из найденных маршрутов выбирается маршрут с наименьшими транспортными затратами:

$$M_{1n_{k+1}}^{k+1} = M_{1n_{j_{\min}}}^{j_{\min}}, \quad \text{где } j_{\min} = \underset{j=1, n^{(i)}}{\operatorname{argmin}} s(g_1^j, g_{n_j}^j), \quad k := k + 1. \quad (2.13)$$

4. Проверяется условие  $k \geq N$ , где  $N$  – задаваемое количество допустимых маршрутов (определяется как количество маршрутов, составляющих начальную популяцию, задаваемую для работы генетического алгоритма). Если данное условие не выполняется, тогда  $i := i + 1$  и осуществляется переход к этапу 2.

Таким образом, определены допустимые маршруты. Далее к найденным допустимым маршрутам применяется *генетический алгоритм* [Рутковская, Пилиньский, 2004]. Блок-схема генетического алгоритма, адаптированного под задачу маршрутизации, приведена на рис. 2.

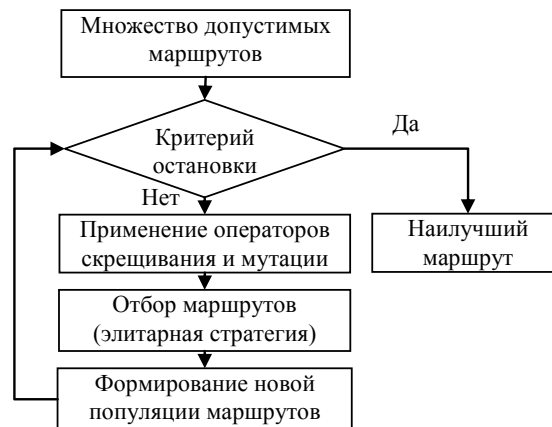


Рис. 2. Блок-схема генетического алгоритма, адаптированного под задачу маршрутизации

Критерием остановки работы генетического алгоритма является нахождение маршрута с минимальными транспортными затратами, который будет оставаться неизменным при последующих итерациях.

Важной частью алгоритма является операция применения оператора скрещивания, который используется в случае наличия у двух маршрутов общего узла или общего ребра.

Для примера приведем алгоритм применения оператора скрещивания по общему узлу.

1. Пусть имеются два допустимых маршрута:

$$M_{1n_k}^k = (g_1^k, g_2^k, \dots, g_{n_k}^k), \quad (2.14)$$

$$M_{1n_l}^l = (g_1^l, g_2^l, \dots, g_{n_l}^l). \quad (2.15)$$

Для маршрутов (2.14), (2.15) начальный и конечный узлы совпадают

$$g_1^k = g_1^l, \quad g_{n_k}^k = g_{n_l}^l, \quad (2.16)$$

а также имеется общий узел,

$$g_i^k = g_j^l, \quad i \in \{2, 3, \dots, n_k - 1\}, \quad j \in \{2, 3, \dots, n_l - 1\}. \quad (2.17)$$

2. Маршруты (2.14) и (2.15) скрещиваются по общему узлу (2.17) и определяются новые маршруты

$$M_{1n_l}^{kl} = (g_1^k, g_2^k, \dots, g_{i-1}^k, g_i^k, g_{j+1}^l, \dots, g_{n_l-1}^l, g_{n_l}^l), \quad (2.18)$$

$$M_{1n_k}^{lk} = (g_1^l, g_2^l, \dots, g_{j-1}^l, g_j^l, g_{i+1}^k, \dots, g_{n_k-1}^k, g_{n_k}^k). \quad (2.19)$$

3. Для вновь найденных маршрутов рассчитываются стоимости перевозок одной тонны условного топлива (2.1)–(2.3). Если стоимости перевозок по новым маршрутам (2.18), (2.19) ниже стоимости перевозок по исходным маршрутам (2.14), (2.15), то они участвуют в дальнейшей работе генетического алгоритма.

### 3. Задача кластеризации

#### 3.1. Постановка задачи

Кластерный анализ проводится для определения мест расположения пунктов подготовки топлива и связанных с ними теплоисточников [Кетова, Трушкова, Кривенков, 2010].

Исходными данными для проведения кластерного анализа выступает информация о местах расположения населенных пунктов с теплоисточниками, которые планируется перевести с традиционных видов топлива на щепу, а также их потребности в топливе. Необходимо оптимальным образом объединить населенные пункты с теплоисточниками в группы близко расположенных друг к другу объектов. В каждом кластере нужно выделить один населенный пункт, в котором и планируется расположить пункт подготовки топлива, при условии минимизации транспортных расходов на перевозку топлива с пункта подготовки топлива до теплоисточников.

Пусть  $H = \{h_i\}$  – множество населенных пунктов с теплоисточниками,  $i = \overline{1, n}$ ,  $n$  – количество рассматриваемых населенных пунктов. Обозначим множество близкорасположенных друг к другу населенных пунктов, образующих  $p$ -й кластер,  $T^p = \{h_j^p\}$ ,  $p \in \{1, 2, \dots, K\}$ ,  $K$  – количество кластеров,  $j$  – номер населенного пункта в кластере,  $j = \overline{1, n_p}$ ,  $n_p$  – количество населенных пунктов в кластере.

Необходимо разбить множество населенных пунктов  $H = \{h_i\}$  на кластеры таким образом, чтобы общие затраты  $Z$  (руб./год) на перевозку топлива с ППТ до теплоисточников были минимальны:

$$Z = \sum_{p=1}^K \sum_{j=1}^{n_p} s(h_m^p, h_j^p) Q_j^p \rightarrow \min, \quad (3.1)$$

где  $h_m^p$  – населенный пункт, в котором планируется расположить ППТ (центр кластера);  $s(h_m^p, h_j^p)$  – транспортные затраты на перевозку топлива (руб./т у.т.) от центра кластера до  $j$ -го населенного пункта;  $Q_j^p$  – суммарная годовая потребность в топливе теплоисточников  $p$ -го кластера, расположенных в  $j$ -м населенном пункте, т у.т./год.

Аналогично по информации о местах расположения и производительности предприятий деревообработки и зонах лесовырубки ставится задача определения мест расположения пунктов накопления сырья. Суть кластерного анализа в данном случае заключается в том, чтобы оптимальным образом объединить предприятия деревообработки и зоны лесовырубки в кластеры и в каждом кластере выбрать место расположения ПНС.

### 3.2. Алгоритм решения задачи кластеризации

Общий алгоритм решения задачи кластеризации объектов региональной распределенной системы теплоснабжения состоит из двух этапов: на первом этапе применяется иерархический кластерный анализ, на втором – метод  $k$ -средних [Олдендерфер, Блэшфилд, 1989]. Иерархический кластерный анализ используется для определения оптимального количества кластеров. Метод  $k$ -средних применяется для распределения объектов по кластерам и определения оптимальных мест расположения ПНС и ППТ, которые выступают центрами данных кластеров.

*Алгоритм иерархического кластерного анализа:*

1. Задается множество населенных пунктов  $H = \{h_i\}$ ,  $i = \overline{1, n}$ .
2. По формулам (2.1)–(2.3) рассчитывается матрица, элементами которой является стоимость перевозки топлива между населенными пунктами:  $S = \{s(h_i, h_j)\}$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ .
3. Задается количество кластеров  $K$ , каждый из которых содержит один населенный пункт:  $K = n$ . Получаем множество кластеров  $\{T^1, T^2, \dots, T^K\}$ .
4. Полученные кластеры объединяются попарно, образуя временные кластеры  $T^p$ ,  $p = \overline{1, C_K^2}$ , где  $C_K^2 = K(K-1)/2$ .
5. Находятся центры  $h_m^p$  временных кластеров  $T^p$ . Центром кластера является населенный пункт  $h_j^p$ , из которого суммарные затраты на транспортировку топлива до всех других населенных пунктов в кластере минимальны:

$$h_m^p = h_j^p, \text{ где } j = \arg \min_{j=1, n^p} \left( \sum_{i=1}^{n_p} s(h_j^p, h_i^p) Q_i^p \right), \quad (3.2)$$

где  $Q_i^p$  – суммарная годовая потребность в топливе теплоисточников  $p$ -го кластера, расположенных в  $i$ -м населенном пункте, т у.т./год.

6. Определяются радиусы  $r^p$  временных кластеров как меры близости от центров кластеров до наиболее удаленных населенных пунктов в каждом из них. В качестве меры близости между объектами используется стоимость перевозки топлива между населенными пунктами:

$$r^p = \max_{j=1, n_p} s(h_m^p, h_j^p), \quad p = \overline{1, K(K-1)/2}. \quad (3.3)$$

7. Из всех временных кластеров выбирается кластер с наименьшим радиусом:

$$T^p : \rho = \arg \min_{p=1, K(K-1)/2} (r^p). \quad (3.4)$$

8. Полученный временный кластер  $T^p$  добавляется во множество исходных кластеров  $\{T^1, T^2, \dots, T^K\}$  этапа 3, причем кластеры, его образующие, исключаются. Тогда  $K := K - 1$ .
9. Этапы 4–8 реализуются до тех пор, пока дальнейшее объединение не приведет к превышению задаваемого оптимального радиуса  $R_{\text{опт}}$ , который был определен как максимальная стоимость перевозки, при которой целесообразно транспортировать древесную щепу:

$$r^p < R_{\text{опт}}. \quad (3.5)$$

10. В случае если остаются кластеры, состоящие из одного населенного пункта, происходит объединение их с ближайшим кластером. В результате смещается центр нового кластера, поэтому осуществляется переход к этапу 4.

Полученное количество кластеров  $K$  условно признается оптимальным.

В результате реализации иерархического кластерного анализа определили оптимальное количество кластеров. Далее для распределения объектов по кластерам и определения их центров используется метод  $k$ -средних.

*Алгоритм метода  $k$ -средних:*

1. Задается количество кластеров  $K$ , полученное в результате проведения иерархического кластерного анализа.
2. Инициализируются центры кластеров:

$$h_m^p = h_j, j = \text{random}(\overline{1, n}), p = \overline{1, K}, \quad (3.6)$$

где  $n$  – количество населенных пунктов.

3. Каждый населенный пункт  $h_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) закрепляется за определенным кластером,  $T^p = \{h_j^p\}$ ,  $p \in \{1, 2, \dots, K\}$ , исходя из минимума транспортных расходов до центров кластеров:

$$h_i \rightarrow h_j^p, p = \arg \min_{p=\overline{1, K}} (s(h_m^p, h_i)), i = \overline{1, n}. \quad (3.7)$$

4. Переопределяются центры кластеров:

$$h_m^p = h_j^p, j = \arg \min_{j=\overline{1, n_p}} \left( \sum_{i=1}^{n_p} s(h_j^p, h_i^p) Q_i^p \right), p = \overline{1, K}. \quad (3.8)$$

5. Если произошло изменение центров кластеров или перераспределение объектов, то осуществляется переход к этапу 3.

Иначе полученные центры кластеров  $h_m^p, p = \overline{1, K}$  и распределение объектов по кластерам  $T^p = \{h_j^p\}, j = \overline{1, n_p}$  считаются оптимальными.

## 4. Задача оптимального распределения ресурсов

### 4.1. Постановка задачи

Задача оптимального распределения ресурсов решается на двух уровнях: районном и региональном. На районном уровне в качестве критерия минимизации выступают транспортные расходы на перевозку древесного сырья с пунктов накопления сырья до пунктов подготовки топлива в пределах одного района. Далее, в связи с различием в объемах производства и потребления топлива на районном уровне, возникает необходимость перераспределения их излишков между ППТ различных районов. Поэтому на региональном уровне решается задача минимизации транспортных расходов на перевозку излишков топлива между районами.



Рассмотрим задачу оптимального распределения ресурсов на районном уровне. Критерий минимизации имеет вид

$$Tr^{(1)} = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M s_{ij}^C Q_{ij}^C \rightarrow \min, \quad (4.1)$$

где  $s_{ij}^C$  – удельные транспортные затраты на доставку древесного сырья с  $i$ -го ПНС на  $j$ -й ППТ, руб./т у.т., определяемые по формулам (1)–(3), где в качестве начального и конечного узлов маршрута выступают ПНС и ППТ соответственно;  $Q_{ij}^C$  – годовой объем древесного сырья, поставляемый с  $i$ -го ПНС на  $j$ -й ППТ, т у.т./год;  $M$  – количество ПНС в районе;  $N$  – количество ППТ в районе.

Введем ограничения на объемы поставок:

$$\sum_{j=1}^N Q_{ij}^C \leq Q_i^{\text{ПНС}}, i = \overline{1, M}, \quad (4.2)$$

$$\sum_{i=1}^M Q_{ij}^C \leq Q_j^{\text{ППТ}}, j = \overline{1, N}, \quad (4.3)$$

где  $Q_i^{\text{ПНС}}$  – годовой объем переработки древесного сырья на  $i$ -м ПНС, т у.т./год;  $Q_j^{\text{ППТ}}$  – годовой объем переработки древесного сырья на  $j$ -м ППТ, т у.т./год.

На региональном уровне критерий минимизации имеет вид

$$Tr^{(2)} = \sum_{j=1}^{N^-} \sum_{i=1}^{N^+} s_{ij}^T Q_{ij}^T \rightarrow \min, \quad (4.4)$$

$$\sum_{i=1}^{N^+} Q_{ij}^T \leq Q_j^{\text{ППТ}^-}, j = \overline{1, N^-}, \quad (4.5)$$

$$\sum_{j=1}^{N^-} Q_{ij}^T \leq Q_i^{\text{ППТ}^+}, i = \overline{1, N^+}, \quad (4.6)$$

где  $s_{ij}^T$  – удельные транспортные затраты на доставку излишков топлива с  $i$ -го ППТ на  $j$ -й ППТ с дефицитом топлива, руб./т у.т.;  $Q_{ij}^T$  – годовой объем перевозки топлива между  $i$ -м и  $j$ -м ППТ, т у.т./год;  $Q_j^{\text{ППТ}^-}$  – годовой дефицит топлива на  $j$ -м ППТ, т у.т./год;  $Q_i^{\text{ППТ}^+}$  – годовой излишек топлива на  $i$ -м ППТ, т у.т./год;  $N^+$  – количество ППТ, на которых образуется излишек топлива;  $N^-$  – количество ППТ с дефицитом топлива.

#### 4.2. Алгоритм решения задачи оптимального распределения ресурсов

Для решения задачи оптимального распределения ресурсов будем использовать метод дифференциальной ренты [Томас, 2006].

Если выполняется условие

$$\sum_{i=1}^M Q_i^{\text{ПНС}} = \sum_{j=1}^N Q_j^{\text{ППТ}}, \quad (4.7)$$

то задача оптимального распределения ресурсов является закрытой транспортной задачей и может решаться методом дифференциальной ренты.

Если условие (4.7) не выполняется, то данная задача является открытой транспортной задачей, и ее необходимо привести к закрытому типу.

Если для рассматриваемого района суммарное годовое производство древесного сырья превышает суммарное годовое потребление сырья, то в данном районе образуется излишек древесного сырья  $Q^{+C}$  (т у.т./год), определяемый по формуле

$$Q^{+C} = \sum_{i=1}^M Q_i^{\text{ПНС}} - \sum_{j=1}^N Q_j^{\text{ППТ}}. \quad (4.8)$$

Если транспортная задача является открытой и в районе имеется излишек древесного сырья, то, для того чтобы свести задачу к задаче закрытого типа, необходимо ввести фиктивный пункт подготовки топлива, годовое потребление которого равно излишку, определенному по формуле (4.8).

Если в районе суммарное годовое производство древесного сырья ниже суммарного годового потребления сырья, то в данном районе образуется дефицит древесного сырья  $Q^{-C}$  (т у.т./год), определяемый по формуле

$$Q^{-C} = \sum_{j=1}^N Q_j^{\text{ППТ}} - \sum_{i=1}^M Q_i^{\text{ПНС}}. \quad (4.9)$$

Если транспортная задача является открытой и в районе имеется дефицит древесного сырья, то для сведения к задаче закрытого типа вводится фиктивный пункт накопления сырья, где годовой объем переработки древесного сырья фиктивного ПНС равен дефициту (4.9).

*Алгоритм решения задачи оптимального распределения ресурсов на региональном уровне:*

1. Обозначим множество ПНС  $\{h_i\}$ ,  $i = \overline{1, M}$ ; множество ППТ  $\{h_j\}$ ,  $j = \overline{1, N}$ . Составляется матрица транспортных затрат на доставку древесного сырья с  $i$ -го ПНС на  $j$ -й ППТ:  $S = \{s^C(h_i, h_j)\} = \{s_{ij}^C\}$ .
2. В каждом столбце матрицы  $S$  определяется элемент, соответствующий минимальному значению транспортных затрат на доставку древесного сырья:

$$i_j^{\min} = \arg \min_{i=\overline{1, M}} (s_{ij}^C), \quad j = \overline{1, N}. \quad (4.10)$$

3. Составляется матрица поставок  $X = (x_{ij})$ ,  $i = \overline{1, M}$ ,  $j = \overline{1, N}$ :

$$x_{ij} = \begin{cases} Q_j^{\text{ППТ}}, & \text{если } i = i_j^{\min}, \\ 0, & \text{если } i \neq i_j^{\min}. \end{cases} \quad (4.11)$$

4. В матрице  $X$  определяются избыточные и недостаточные строки с целью определить избыток или недостаток сырья на ПНС. Строки определяются по следующему правилу:

– строка  $i$  является *избыточной*, если для нее выполняется условие

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} < Q_i^{\text{ПНС}} \quad (4.12)$$

– строка  $i$  является *недостаточной*, если для нее выполняется условие:

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} > Q_i^{\text{ПНС}}. \quad (4.13)$$

Если строка не удовлетворяет одновременно условиям (4.12) и (4.13), то такая строка называется *нулевой*.

5. Для каждого столбца матрицы  $S$  определяется разность между ближайшим по величине значением транспортных затрат в избыточной строке и числом  $s^c(h_{j_{\min}}, h_j)$ . Если число  $s^c(h_{j_{\min}}, h_j)$  находится в избыточной строке, то разность не определяется. Минимальная из полученных разностей соответствует *промежуточной ренте*.
6. К элементам матрицы транспортных затрат, расположенным в недостаточных строках, добавляется промежуточная рента и строится новая матрица транспортных затрат.
7. Переход к этапу 2. Процесс выполняется до тех пор, пока все строки не станут нулевыми, то есть все запасы будут распределены, а потребности обеспечены.

В результате реализации метода дифференциальной ренты получаем решение задачи оптимального распределения ресурсов на районном уровне:

$$Q_{ij}^c = x_{ij}, i = \overline{1, M}, j = \overline{1, N}. \quad (4.14)$$

Задача оптимального распределения ресурсов на региональном уровне (4.4)–(4.6) при необходимости сводится к закрытому типу и решается методом дифференциальной ренты.

## 5. Задача оптимального управления запасами

### 5.1. Постановка задачи

Для создания и регулирования запасов и их резервов в целях обеспечения непрерывности и надежности производства тепловой энергии необходимо решить задачу оптимального управления запасами.

Рассматривается трехуровневая складская система топливоснабжения распределенных источников теплоснабжения региона.

*Первый уровень* составляют пункты накопления древесного сырья. Эти пункты максимально приближены к зонам лесовырубок и располагаются, как правило, на пересечении дорог. Сбор сырья на ПНС начинается в момент времени  $t_{Cn}^+$  и равномерно продолжается до момента времени  $t_{Ck}^+$ . На ПНС происходит естественная сушка древесной массы в течение 1–3 месяцев в теплое время года. В результате сушки влажность древесного сырья снижается с 60 % до 30 %. Вывоз сырья на пункты подготовки топлива начинается с момента времени  $t_{Cn}^-$  и продолжается до момента  $t_{Ck}^-$ .

*Второй уровень* составляют пункты подготовки топлива. На эти пункты поступает предварительно подготовленное древесное сырье. На пунктах подготовки топлива осуществляется измельчение сырья в топливо – щепу (производительность линии на ППТ  $p(t)$ , т у.т./сутки).

*Третий уровень* составляют склады теплоисточников, куда в течение промежутка времени  $[t_{Tn}^+, t_{Tk}^+]$  свозится подготовленная щепа. Параллельно с конца сентября начинается отопительный сезон  $[t_{Tn}^-, t_{Tk}^-]$ , в течение которого топливо расходуется (см. рис. 3). Расход топлива на теплоисточниках определяется их нагрузкой и изменением температурного режима в течение отопительного сезона.

**Допущение 2.** Будем считать, что в рассматриваемой трехуровневой складской системе находится  $M$  пунктов накопления сырья,  $L$  теплоисточников и только один пункт подготовки топлива.

**Допущение 3.** Считается, что в рассматриваемой системе транспортные перевозки сырья и топлива осуществляются централизованно.

Обозначим через  $Q_{Ci}^{ПНС}$ ,  $Q_C^{ППТ}$ ,  $Q_T^{ППТ}$ ,  $Q_{Tj}^T$  – текущие объемы древесного сырья на  $i$ -м ПНС ( $i = \overline{1, M}$ ), текущие объемы древесного сырья и топлива на ППТ, а также текущие объемы топ-

лива на  $j$ -м теплоисточнике ( $j = \overline{1, L}$ ) соответственно, т.у.т.;  $q_{Ci}^{+ПНС}, q_{Tj}^{+T}$  – скорости пополнения древесного сырья на  $i$ -м ПНС и пополнения топлива на  $j$ -м теплоисточнике, т.у.т./сутки;  $q_{Ci}^{-ПНС}, q_{Tj}^{-T}$  – скорости расходования древесного сырья на  $i$ -м ПНС и топлива на  $j$ -м теплоисточнике, т.у.т./сутки;  $q_C^{-ППТ}, q_T^{+ППТ}$  – скорости расходования древесного сырья и пополнения топлива на ППТ, т.у.т./сутки. Заметим, что согласно *Допущения 2* в системе имеется только один ППТ, поэтому скорость пополнения сырья на ППТ определяется суммированием скоростей расходования древесного сырья  $q_C^{-ПНС}$  на всех ПНС.

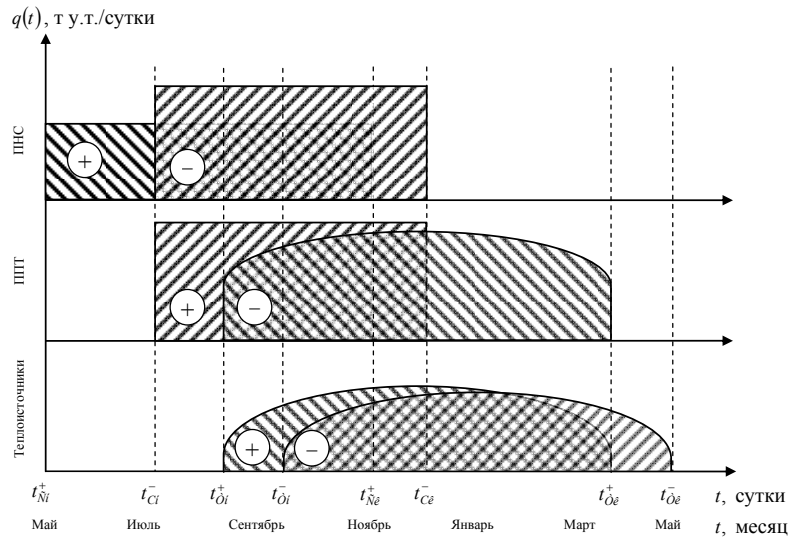


Рис. 3. Схема движения сырья и топлива на различных уровнях логистической системы

**Допущение 4.** Будем считать, что линия по производству щепы запускается в момент времени  $t_{Cn}^-$  поступления древесного сырья на склад ППТ.

В связи с *Допущением 4* скорости расходования древесного сырья и пополнения топлива на ППТ равны и определяются производительностью оборудования  $p(t)$ , т.у.т./сутки:

$$q_C^{-ППТ}(t) = q_T^{+ППТ}(t) = p(t). \tag{5.1}$$

Скорости пополнения древесного сырья на ПНС определяются исходя из объемов выруб-ки леса, утвержденных лесным планом.

Объем потребляемого топлива теплоисточниками в течение отопительного периода  $[t_{Tn}^-, t_{Tk}^-]$  непостоянен. Динамика потребления топлива на теплоисточниках  $(q_{Tj}^{-T}(t), j = \overline{1, L})$  определяется с учетом функции сезонности  $s(t)$ :

$$q_{Tj}^{-T}(t) = q_{T0j}^{-T} s(t), \tag{5.2}$$

где  $q_{T0j}^{-T}$  – удельные расходы топлива на  $j$ -м теплоисточнике при равномерном потреблении в течение отопительного периода, т.у.т./сутки.

Система уравнений, описывающая изменение запасов в различных пунктах трехуровневой складской системы топливоснабжения, имеет вид

$$\frac{dQ_{Ci}^{ПНС}}{dt} = q_{Ci}^{+ПНС}(t) - q_{Ci}^{-ПНС}(t), i = \overline{1, M}, \tag{5.3}$$

$$\frac{dQ_C^{\text{ПНТ}}}{dt} = \sum_{i=1}^M q_{Ci}^{-\text{ПНТ}}(t) - q_C^{-\text{ПНТ}}(t), \quad (5.4)$$

$$\frac{dQ_T^{\text{ПНТ}}}{dt} = q_T^{+\text{ПНТ}}(t) - \sum_{j=1}^L q_{Tj}^{+T}(t), \quad (5.5)$$

$$\frac{dQ_{Tj}^T}{dt} = q_{Tj}^{+\text{ПНТ}}(t) - q_{Tj}^{-\text{ПНТ}}(t), \quad j = \overline{1, L}. \quad (5.6)$$

Сформулируем **допущение 5**: В конце каждого периода все запасы топлива на складах ПНТ и теплоисточниках, а также запасы древесного сырья на ПНС расходуются без остатка.

На основании *Допущения 5* должны выполняться следующие балансовые уравнения:

$$\int_{\Delta t_C^+} q_{Ci}^{+\text{ПНТ}}(t) dt = \int_{\Delta t_C^-} q_{Ci}^{-\text{ПНТ}}(t) dt, \quad (5.7)$$

$$\sum_{i=1}^M \int_{\Delta t_C^-} q_{Ci}^{-\text{ПНТ}}(t) dt = \sum_{j=1}^L \int_{\Delta t_T^+} q_{Tj}^{+T}(t) dt, \quad (5.8)$$

$$\int_{\Delta t_T^+} q_{Tj}^{+T}(t) dt = \int_{\Delta t_T^-} q_{Tj}^{-T}(t) dt, \quad (5.9)$$

где  $\Delta t_C^+$ ,  $\Delta t_C^-$ ,  $\Delta t_T^+$ ,  $\Delta t_T^-$  – периоды пополнения и расходования древесного сырья и топлива соответственно, такие что:

$$t_{Cn}^+ + \Delta t_C^+ = t_{Ck}^+, \quad t_{Cn}^- + \Delta t_C^- = t_{Ck}^-, \quad t_{Tn}^+ + \Delta t_T^+ = t_{Tk}^+, \quad t_{Tn}^- + \Delta t_T^- = t_{Tk}^-. \quad (5.10)$$

Суть решения задачи оптимального управления запасами в складской системе топливоснабжения заключается в минимизации общих складских расходов за весь период  $[t_{Cn}^+, t_{Tk}^-]$  от начала сбора древесного сырья до конца отопительного периода:

$$F(q_{C1}^{-\text{ПНТ}}, q_{C2}^{-\text{ПНТ}}, \dots, q_{CM}^{-\text{ПНТ}}, q_{T1}^{+T}, q_{T2}^{+T}, \dots, q_{TL}^{+T}) \rightarrow \min, \quad (5.11)$$

где функции  $q_{Ci}^{-\text{ПНТ}}(t)$ ,  $q_{Tj}^{+T}(t)$  являются управляющими функциями.

Поскольку на ПНС происходит естественная сушка древесной массы, то в результате влажность древесного сырья снижается с 60 % до 30 %. Влажность щепы также составляет 30 %.

Введем ограничения на объемы запасов на складах с учетом влажности сырья:

$$0 \leq \int_{t_{Cu}^+}^t \beta_1 q_{Ci}^{+\text{ПНТ}}(\tau) d\tau - \int_{t_{Cu}^-}^t \beta_2 q_{Ci}^{-\text{ПНТ}}(\tau) d\tau \leq V_{Ci}^{\text{ПНТ}}, \quad i = \overline{1, M}, \quad (5.12)$$

$$0 \leq \sum_{i=1}^M \int_{t_{Cu}^-}^t q_{Ci}^{-\text{ПНТ}}(\tau) d\tau - \int_{t_{Cu}^-}^t q_C^{-\text{ПНТ}}(\tau) d\tau \leq \frac{V_C^{\text{ПНТ}}}{\beta_2}, \quad (5.13)$$

$$0 \leq \int_{t_{Cu}^-}^t q_T^{+\text{ПНТ}}(\tau) d\tau - \sum_{j=1}^L \int_{t_{Tu}^+}^t q_{Tj}^{+T}(\tau) d\tau \leq \frac{V_T^{\text{ПНТ}}}{\beta_2}, \quad (5.14)$$

$$Q_{Tj}^{Tr} \leq \int_{t_{Tu}^+}^t q_{Tj}^{+T}(\tau) d\tau - \int_{t_{Tu}^-}^t q_{Tj}^{-T}(\tau) d\tau \leq \frac{V_{Tj}^T}{\beta_2}, \quad j = \overline{1, L}, \quad (5.15)$$

где  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  – коэффициенты, определяющие количество насыпных кубических метров древесного сырья с влажностью 60 % и 30 % соответственно в одной тонне условного топлива, нас. м<sup>3</sup>/т у.т.;  $V_{Ci}^{\text{ПНТ}}$  – объем склада для хранения древесного сырья на  $i$ -м ПНС, нас. м<sup>3</sup>;  $V_C^{\text{ПНТ}}$ ,  $V_T^{\text{ПНТ}}$  – объемы складов для хранения древесного сырья и топлива на ПНТ, нас. м<sup>3</sup>;  $Q_{Tj}^{Tr}$  –

размер резервного запаса топлива на  $j$ -м теплоисточнике, т у.т.;  $V_{Tj}^T$  – объем топливного склада на  $j$ -м теплоисточнике, нас. м<sup>3</sup>.

Общие складские расходы (5.11) складываются из трех частей: из стоимости материального запаса, из организационных расходов, связанных с оформлением материального запаса, его доставкой, разгрузкой и т. п., а также из расходов на хранение:

$$F = F^I + F^{II} + F^{III}. \quad (5.16)$$

1. Стоимость материального запаса:

$$F^I = \sum_{j=1}^L c_{Tj} \int_{\Delta t_j^+} q_{Tj}^{+T}(t) dt, \quad (5.17)$$

где  $c_{Tj}$  – стоимость топлива, поставляемого на  $j$ -й теплоисточник с ППТ, руб./т у.т.

2. Организационные издержки:

$$F^{II} = \sum_{i=1}^M z_{Ci} n_{Ci} + \sum_{j=1}^L z_{Tj} n_{Tj}, \quad (5.18)$$

где  $z_{Ci}$  – издержки на организацию одной поставки древесного сырья с  $i$ -го ПНС, руб./поставка;  $z_{Tj}$  – издержки на организацию одной поставки топлива на  $j$ -й теплоисточник, руб./поставка;  $n_{Ci}$ ,  $n_{Tj}$  – количество поставок древесного сырья с  $i$ -го ПНС и топлива на  $j$ -й теплоисточник за отопительный период.

Введем функции  $\eta_{Ci}(t)$ ,  $i = \overline{1, M}$  и  $\eta_{Tj}(t)$ ,  $j = \overline{1, L}$ , такие что:

$$\eta_{Ci}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } q_{Ci}^{-\text{ПНС}}(t) > 0, \\ 0, & \text{если } q_{Ci}^{-\text{ПНС}}(t) = 0; \end{cases} \quad i = \overline{1, M}, \quad (5.19)$$

$$\eta_{Tj}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } q_{Tj}^{+T}(t) > 0, \\ 0, & \text{если } q_{Tj}^{+T}(t) = 0. \end{cases} \quad j = \overline{1, L}. \quad (5.20)$$

Тогда

$$n_{Ci} = \sum_{\Delta t_C} \eta_{Ci}(t), \quad i = \overline{1, M}, \quad (5.21)$$

$$n_{Tj} = \sum_{\Delta t_T} \eta_{Tj}(t), \quad j = \overline{1, L}. \quad (5.22)$$

3. Издержки на хранение основного запаса:

$$F^{III} = h_C \int_{\bar{t}_{Cn}}^{\bar{t}_{Ck}^+} Q_C^{III}(t) dt + h_T \int_{\bar{t}_{Cn}}^{\bar{t}_{Ck}^+} Q_T^{III}(t) dt + \sum_{j=1}^L h_{Tj} \int_{\bar{t}_{Tn}}^{\bar{t}_{Tk}} Q_{Tj}^T(t) dt, \quad (5.23)$$

где  $h_C$ ,  $h_T$  – удельные издержки на хранение древесного сырья и топлива на ППТ, руб./(т у.т.·сутки);  $h_{Tj}$  – удельные издержки на хранение топлива на  $j$ -м теплоисточнике, руб./(т у.т.·сутки). Удельные издержки включают в себя затраты на аренду склада, амортизацию в процессе хранения и т. д.

## 5.2. Алгоритм решения задачи оптимального управления запасами

Для решения задачи оптимального управления запасами в системе топливоснабжения региона введем ряд ограничений.

1. Объемы партий поставок древесного сырья с ПНС на ППТ постоянны и должны удовлетворять условиям непрерывного процесса производства топлива с учетом производительности оборудования  $p(t)$  (т у.т./сутки) на ППТ:

$$q_{Ci}^{-\text{ПНС}}(t) = \begin{cases} x_i^{(1)}, & \text{если } Q_C^{\text{ППТ}}(t) \leq Q_C^{*\text{ППТ}}, \\ 0, & \text{если } Q_C^{\text{ППТ}}(t) > Q_C^{*\text{ППТ}}; \end{cases} \quad i = \overline{1, M}, \quad (5.24)$$

где  $Q_C^{*\text{ППТ}}$  – объем переработки древесного сырья на ППТ (т у.т.) в течение периода поставки  $t_{\text{пост}}^{\text{ППТ}}$  (сутки), определяемый по формуле:

$$Q_C^{*\text{ППТ}} = p(t) t_{\text{пост}}^{\text{ППТ}}. \quad (5.25)$$

2. Объемы партий поставок топлива на теплоисточники в течение отопительного периода постоянны и определяются с учетом резервных запасов топлива  $Q_T^{Tr}$  на складах теплоисточников:

$$q_{Tj}^{+T}(t) = \begin{cases} x_j^{(2)}, & \text{если } Q_{Tj}^T(t) \leq Q_{Tj}^{Tr}, \\ 0, & \text{если } Q_{Tj}^T(t) > Q_{Tj}^{Tr}; \end{cases} \quad j = \overline{1, L}. \quad (5.26)$$

Пусть  $X_1 = (x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_M^{(1)})$  и  $X_2 = (x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, \dots, x_L^{(2)})$  – вектора объемов партий поставок древесного сырья с ПНС на ППТ и топлива на теплоисточники соответственно, которые будут являться параметрами задачи оптимального управления запасами. Тогда целевую функцию задачи оптимального управления запасами (5.11) перепишем в виде:

$$F(X_1, X_2) \rightarrow \min. \quad (5.27)$$

В ограничениях на объемы запасов на складах теплоисточников, представленных формулой (5.15), объемы складов  $V_T^T$  ( $\text{м}^3$ ) определяются следующим образом:

$$V_{Tj}^T = \beta_2 (Q_{Tj}^{Tr} + x_j^{(2)} t_{\text{пост}}^T), \quad j = \overline{1, L}, \quad (5.28)$$

где  $t_{\text{пост}}^T$  – период поставки топлива на теплоисточники, *сутки*.

Задача управления запасами в системе топливоснабжения региона заключается в поиске оптимизационных параметров  $X_1 = (x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_M^{(1)})$  и  $X_2 = (x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, \dots, x_L^{(2)})$ , удовлетворяющих условиям (5.27), (5.12)–(5.15).

Данная задача относится к классу задач математического программирования и решается гибридным алгоритмом, состоящим из генетического алгоритма (ГА) и метода Хука–Дживса [Тенев, Якимович, 2010].

При использовании генетического алгоритма параметры оптимизации представляются в виде кодированных значений (генов) [Рутковская, Пилиньский, 2004]. Совокупность генов образует хромосому. Из хромосом составляется популяция. Пример хромосомы  $\bar{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  для рассматриваемой задачи представлен на рис. 4.

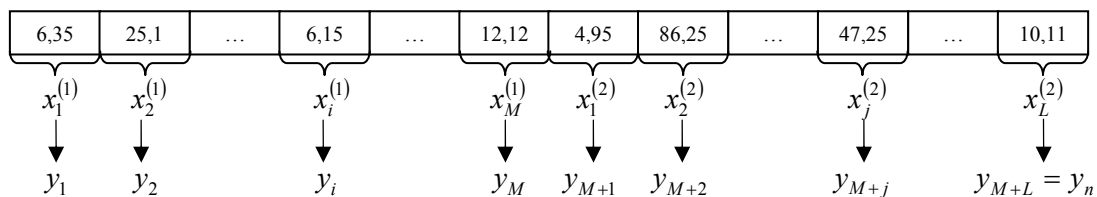


Рис. 4. Пример хромосомы

Каждой хромосоме ставится в соответствие функция приспособленности, которая выступает мерой качества решения, описываемого данной особью. В качестве функции приспособленности выступает целевая функция (5.27).

Алгоритм гибридного генетического алгоритма с дополнительным обучением лидера методом Хука–Дживса представлен в работе [Кетова, Русяк, 2009].

Примененный гибридный алгоритм основан на последовательной работе двух методов, суть которой заключается в том, что на каждой итерации основного метода (ГА) предпринимается попытка улучшения решения с помощью дополнительного метода оптимизации (метод Хука–Дживса). Благодаря этому гибридный генетический алгоритм повышает адаптационные свойства каждого из методов, применяемых в данной схеме, и дает в большинстве случаев лучшие результаты, чем отдельные методы.

## 6. Результаты решения логистической задачи топливоснабжения региона (на примере Удмуртской Республики)

### 6.1. Оптимальная схема размещения предприятий по производству древесных видов топлива

Построение оптимальной схемы размещения предприятий по производству древесных видов топлива в Удмуртской Республике (УР) осуществляется в результате решения задачи кластеризации.



Рис. 5. Схема расположения пунктов по производству щепы на территории УР



Расчеты показали, что в УР следует организовать 24 пункта подготовки топлива, которые будут снабжать щепой 297 теплоисточников, расположенных в отдаленных населенных пунктах республики. Также определены места расположения 94-х пунктов накопления сырья. На рис. 5 представлена схема расположения ПНС и ППТ на территории УР.

### 6.2. Оптимальные маршруты поставок древесного сырья и топлива

Построение оптимальных маршрутов поставок древесного сырья и топлива осуществляется на основе решения задачи маршрутизации.

Между пунктами подготовки топлива и пунктами накопления сырья с использованием карты оптимальных маршрутов решается задача оптимального распределения ресурсов на районном уровне. В результате строится план поставок древесного сырья.

Так, например, маршруты поставок древесного сырья для Дебёсского района Удмуртской Республики представлены на рис. 6а). Оптимальные маршруты перевозок топлива с ППТ до теплоисточников представлены на рис. 6б).

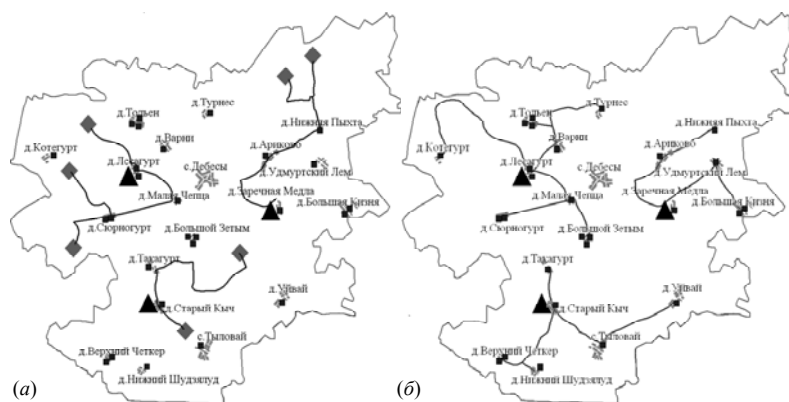


Рис. 6. Схема маршрутов для Дебёсского района УР: (а) перевозки древесного сырья с ПНС на ППТ; (б) перевозки топлива с ППТ на теплоисточники

Оптимальные маршруты перевозок древесного сырья с ПНС на ППТ, а также оптимальные маршруты перевозок топлива с ППТ до теплоисточников Удмуртской Республики представлены на рис. 7.

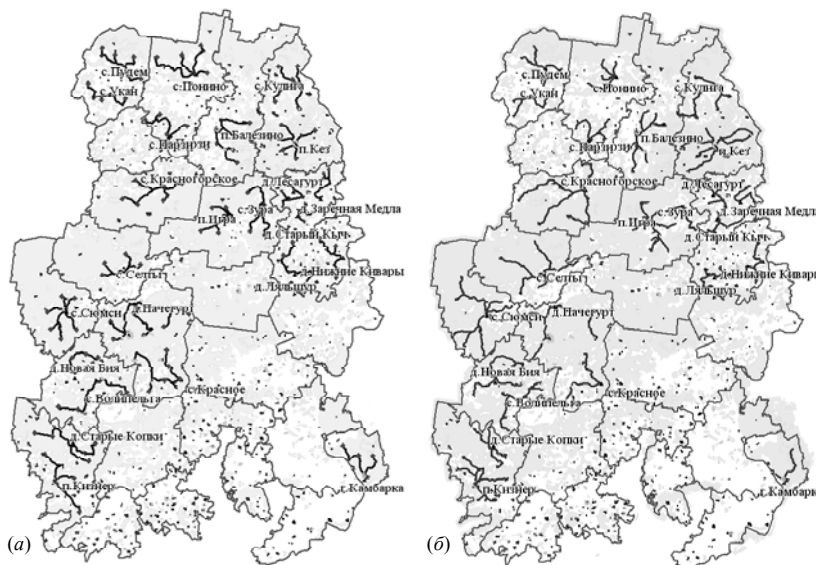


Рис. 7. Оптимальные маршруты перевозки для УР: (а) перевозки древесного сырья с ПНС на ППТ; (б) перевозки топлива с ППТ на теплоисточники

### 6.3. Оптимальное управление запасами в системе топливоснабжения

В результате решения задачи оптимального управления запасами в системе топливоснабжения региона были определены объемы и время поставок древесного сырья на ППТ и топлива на теплоисточники.

Рассмотрим результаты решения задачи управления запасами на примере ППТ, который планируется организовать в д. Заречная Медла Дебёсского района УР. Схема системы топливоснабжения теплоисточников с ППТ в д. Заречная Медла представлена на рис. 8.

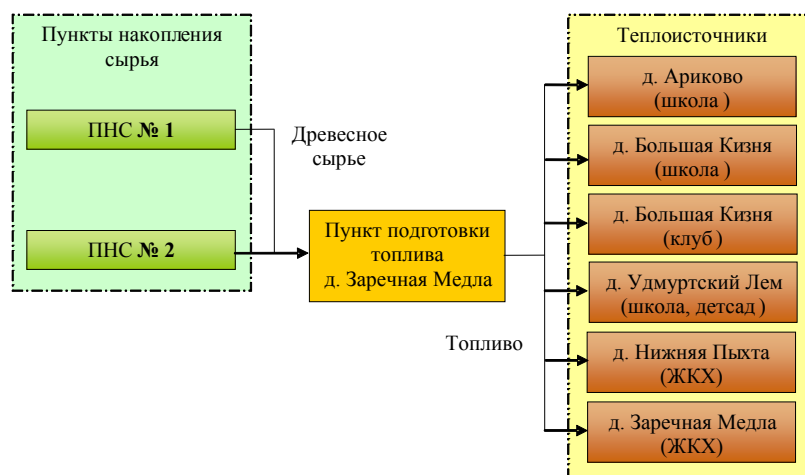


Рис. 8. Схема системы топливоснабжения

На ППТ в д. Заречная Медла будет доставляться древесное сырье с 2-х ПНС, суммарный энергетический потенциал которого должен составлять 941,82 т у.т./год. Данный ППТ будет снабжать топливом шесть теплоисточников Дебёсского района.

На ППТ древесное сырье доставляется с начала июля до конца ноября. В течение этого периода на ППТ работает линия по производству щепы. Производительность линии составляет 7,66 т у.т./сутки. Доставка древесного сырья осуществляется с 2-х ПНС равными партиями с периодичностью для ПНС № 1 один раз в 3 дня, для ПНС № 2 один раз в 4 дня.

На рис. 9а представлен график изменения запаса древесного сырья на складе ППТ.

С учетом производительности линии и функций  $q_{T_j}^{+T}(t)$  поставок топлива на теплоисточники, полученных в результате решения задачи управления запасами, построен график изменения объемов запаса топлива на ППТ (см. рис. 9б).

Продолжительность отопительного периода составляет 220 дней – с конца сентября до конца апреля. На рис. 9в представлены графики изменения объемов топлива на теплоисточниках в течение отопительного периода.

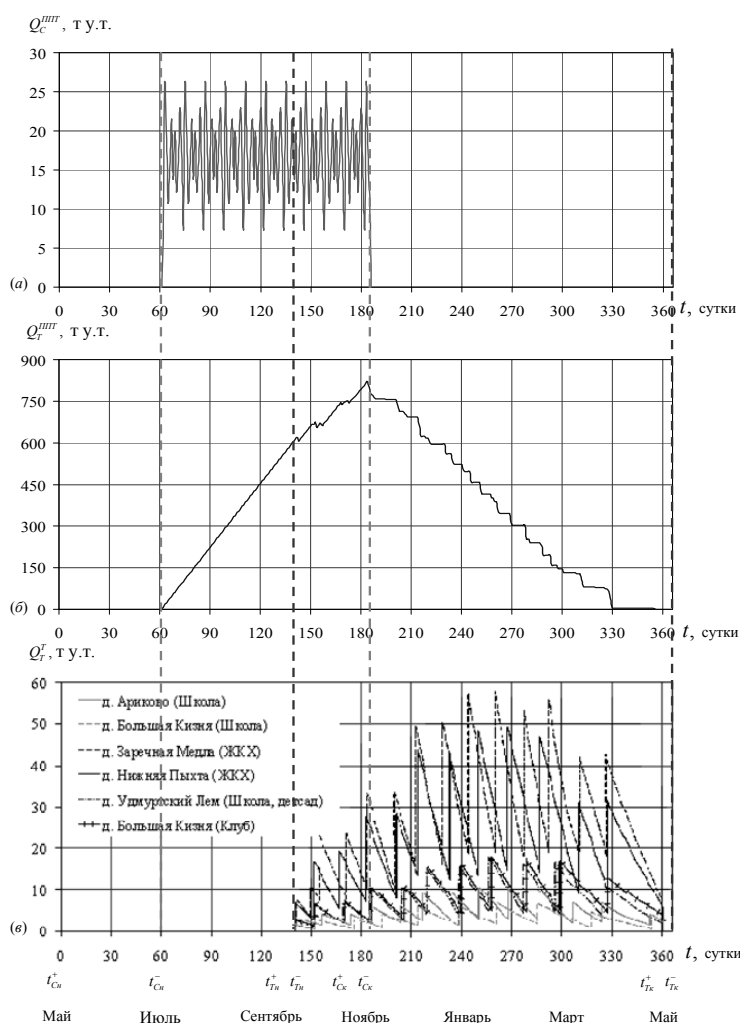


Рис. 9. Изменение объемов запаса на складах объектов системы топливоснабжения в д. Заречная Медля: (а) древесного сырья на ППТ; (б) топлива на ППТ; (в) топлива на теплоисточниках, снабжаемых с ППТ

## Список литературы

- Кетова К. В., Русяк И. Г. Идентификация и прогнозирование обобщающих показателей развития региональной экономической системы // Прикладная эконометрика. – 2009. – № 3. – С. 56–71.
- Кетова К. В., Трушкова Е. В., Кривенков Р. Ю. Применение кластерного анализа для решения задачи оптимального распределения топливно-энергетических ресурсов // Интеллектуальные системы в производстве. – Ижевск: ИжГТУ, 2010. – № 2. – С. 207–213.
- Олдендерфер М. С., Блэшфилд Р. К. Кластерный анализ / Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. Под. ред. И. С. Енюкова. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 215 с.
- Рассел С. Дж., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. – М.: Вильямс, 2006. – С. 1408.
- Русяк И. Г., Преснухин В. К., Кетова К. В., Королёв С. А., Трушкова Е. В. Разработка концепции топливообеспечения распределенной региональной системы теплоснабжения местными возобновляемыми видами топлива // Энергобезопасность и энергосбережение. – М.: МИЭЭ, 2010. – №5. – С. 14–20.

- Рутковская Д., Пилиньский М.* Информационные нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Телеком, 2004. – С. 452.
- Тененев В. А., Якимович Б. А.* Генетические алгоритмы в моделировании систем: монография. – Ижевск: ИжГТУ, 2010. – 306 с.
- Томас Х.* Линейное программирование // Алгоритмы: построение и анализ. – М.: Вильямс, 2006. – С. 1296.