

ПОСТРОЕНИЕ РАСПИСАНИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О РЮКЗАКЕ

Андреев Д.И., аспирант гр. АЗ-31, ИШИТР

e-mail: ad_tomsk@tpu.ru

Муравьев С.В., д.т.н., профессор, ОАР ИШИТР

e-mail: muravyov@tpu.ru

НИИ ТПУ, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Введение

Эффективность осуществления инвестиционно-строительных проектов значительно зависит от качества календарно-сетевого планирования (КСП). Современные подходы к КСП предполагают постоянные изменения и улучшения на протяжении всего жизненного цикла проекта, что позволяет адаптироваться к изменяющимся условиям и рискам. Анализ эффективности выполнения проектов в строительной отрасли [1–3] показывает, что, например, в США 75% таких проектов сталкиваются с задержкой сроков выполнения. Основная цель сетевого планирования состоит в **минимизации сроков реализации проекта**.

Повышение эффективности КСП позволяет сократить издержки производства и повысить конкурентную привлекательность компании. Организация КСП крупных инвестиционных строительных проектов требует использования программного обеспечения на основе алгоритмов, которые позволяли бы изменять параметры расписаний строительных работ в режиме реального времени.

Для достижения этой цели необходимо формально представить и оптимизировать последовательность и взаимозависимость работ, действий и/или мероприятий, обеспечивающих своевременное достижение ключевых этапов (вех) работ за счет эффективного управления технико-людскими ресурсами (ТЛР).

Постановка задачи

Одним из возможных подходов является применение комбинаторной оптимизационной задачи о рюкзаке (*knapsack problem*). Задача состоит в том, чтобы из заданного множества предметов, характеризующихся *стоимостью* и *весом* отобрать подмножество с максимальной стоимостью при ограничении на суммарный вес [4].

Пусть имеется n предметов; количество x_i копий каждого предмета определяется выбором между 0 или 1; для каждого i -го предмета заданы его вес $w_i > 0$ и стоимость $v_i > 0$, $i = 1, \dots, n$; задана также грузоподъемность W рюкзака. Тогда задача о рюкзаке формулируется следующим образом:

$$\text{найти} \quad \max \sum_{i=1}^n v_i x_i \quad \text{при ограничениях} \quad \sum_{i=1}^n w_i x_i \leq W \quad \text{и} \quad x_i \in \{0,1\}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (1)$$

По аналогии с задачей о рюкзаке *задача о расписании* может быть представлена как выбор и последовательное выполнение набора работ (заданий) с учетом временных ограничений и их важности в рамках проекта. Оптимальным будем считать **расписание, которое минимизирует количество запаздывающих работ**.

Роль предметов в задаче о расписании будут выполнять работы. Стоимость предметов будем трактовать как время выполнения работы p_i ; в каждый момент времени может только одна работа. Вес w_i предметов в задаче о расписании можно трактовать как доход, полученный от выполнения работы [5].

Пусть имеются n работ, $i = 1, \dots, n$, для каждой из которых заданы время выполнения p_i , срок начала r_i , срок выполнения d_i и вес (доход) w_i . Необходимо составить расписание работ для одного ТЛР так, чтобы **минимизировать сумму весов запаздывающих работ**. При этом прерывание любой работы не разрешено. Пусть также для работ выполняется условие $d_1 \leq d_2 \leq \dots \leq d_n$.

Тогда задача о расписании состоит в нахождении допустимого множества работ с максимальным весом может быть сформулирована в форме задачи о рюкзаке [5]:

$$\max \sum_{j=1}^n w_j x_j \text{ при ограничениях } \sum_{j=1}^n p_j x_j \leq d, d = d_1 = \dots = d_n \text{ и } x_i \in \{0,1\}, j = 1, \dots, n. \quad (2)$$

Ясно, что работа j может начинаться не раньше срока r_j и должна завершиться не позже срока d_j . Кроме того, необходимо учитывать ограничения по времени: суммарные времена выполнения выбранных заданий не должны превышать доступного времени.

Методы решения

Трансформация перечня строительных работ в набор операций, выполняемых ТЛР, позволяет применить для организации этих работ описанную выше задачу построения оптимального расписания. Трансформация предполагает детальный анализ работ и выделение ключевых этапов их выполнения. Воспользуемся, например, информацией из справочника строительных работ, см. табл. 1. Трансформируя работу «Расчистка от лесорастительности 10 гектаров леса», получаем соответствующий перечень операций ТЛР, как показано на рис. 1.

Таблица 1

Требуемые технико-людские ресурсы для расчистки от лесорастительности 1 га из справочника

Наименование	Ед. изм.	Кол-во	Нормы (час.)
Затраты труда рабочих-строителей	чел. ч		240,863
Вальщик леса	чел. ч	4	192,69
Подсобный рабочий	чел. ч	1	48,17
Эксплуатация машин и механизмов	маш. ч		58,653
Бульдозер среднего класса (массой 21–35 т)	маш. ч	1	13,56
Комбайн лесосечный	маш. ч	1	9,62
Трактор трелевочный	маш. ч	1	12,50
Экскаватор гусеничный среднего класса (массой 16–35 т)	маш. ч	1	22,972

```
"operation_name": "Расчистка от лесорастительности", "quantity_work": 10
{"type_tlr": "Вальщик леса", "quant_tlr": 4, "oper_rank": 0, "oper_id": 0, "value": 500, "rank_unl": 1, "total_time": 1926.9},
{"type_tlr": "Подсобный рабочий", "quant_tlr": 1, "oper_rank": 0, "oper_id": 0, "value": 500, "rank_unl": 1, "total_time": 481.7},
{"type_tlr": "Бульдозер", "quant_tlr": 1, "oper_rank": 0, "oper_id": 0, "value": 500, "rank_unl": 1, "total_time": 135.6},
{"type_tlr": "Комбайн", "quant_tlr": 1, "oper_rank": 0, "oper_id": 0, "value": 500, "rank_unl": 1, "total_time": 96.2},
{"type_tlr": "Трактор трелевочный", "quant_tlr": 1, "oper_rank": 0, "oper_id": 0, "value": 500, "rank_unl": 1, "total_time": 125.0},
{"type_tlr": "Экскаватор", "quant_tlr": 1, "oper_rank": 0, "oper_id": 0, "value": 500, "rank_unl": 1, "total_time": 229.72}
```

Рис. 1. Вид базы данных операций по расчистке 10 га лесорастительности

Для решения задачи (2) традиционно используются следующие методы [4, 5]:

- *динамическое программирование* (задача разбивается на подзадачи, результаты решения которых используются для построения решения полной задачи; может требовать значительных вычислительных ресурсов в худшем случае);
- *генетические и метаэвристические методы* (эволюционные алгоритмы, где набор решений рассматривается как популяция; способны находить близкие к оптимальным решения для высоко размерных задач, но не гарантируют оптимального решения);
- *метод ветвей и границ* (метод сокращенного перебора при поиске оптимального решения; обеспечивает более эффективный поиск решения, т. к. отсекает лишнее количество рассматриваемых подзадач; гарантирует нахождение оптимального решения, но может требовать значительных вычислительных ресурсов в худшем случае).

В ходе предварительных исследований, был применен метод ветвей и границ для решения задачи оптимального планирования работ для двух групп ТЛР – «комбайн» и «бульдозер», см. рис. 2. Применение метода позволило гарантировать нахождение *оптимального расписания*.

Планируем ресурс Бульдозер

Тип ТЛР = Бульдозер, Количество ТЛР = 3, Общая ценность: 1050, Общий вес: 135.92

Операция 1: Расчистка от лесорастительности, Кол-во единиц = 1, Ранг = 0, Вес = 135.6, Ценность = 500, Удельный вес = 3.68

Время начала: 01-10-2023 09:00:00, Время окончания: 13-10-2023 12:36:00

Операция 2: Разработка грунта, Кол-во единиц = 1, Ранг = 1, Вес = 0.07, Ценность = 300, Удельный вес = 4285.71

Время начала: 13-10-2023 12:36:00, Время окончания: 13-10-2023 12:40:12

Операция 3: обратная засыпка, Кол-во единиц = 1, Ранг = 2, Вес = 0.25, Ценность = 250, Удельный вес = 1000.0

Время начала: 13-10-2023 12:40:12, Время окончания: 13-10-2023 12:55:12

Планируем ресурс Комбайн

Тип ТЛР = Комбайн, Количество ТЛР = 2, Общая ценность: 520, Общий вес: 932.0

Операция 1: Расчистка от лесорастительности, Кол-во единиц = 1, Ранг = 0, Вес = 96.2, Ценность = 500, Удельный вес = 5.19

Время начала: 01-10-2023 09:00:00, Время окончания: 09-10-2023 17:12:00

Операция 2: Мульчирование, Кол-во единиц = 1, Ранг = 0, Вес = 835.8, Ценность = 20, Удельный вес = 0.02

Время начала: 09-10-2023 17:12:00, Время окончания: 24-12-2023 19:48:00

Рис. 2. Пример полученного расписания для технико-людских ресурсов

Заключение

В условиях постоянно растущих требований к эффективности и срокам выполнения строительных проектов применение современных методов КСП стало особенно актуальным. Использование строго обоснованных формальных моделей построения оптимальных расписаний и эффективных методов их реализации должен позволить более эффективно управлять временными и ресурсными ограничениями в режиме реального времени, что приведет к повышению успешности проектов. В данном исследовании удалось реализовать механизм оптимального планирования работ для групп ТЛР последовательно в один поток, в дальнейших исследованиях планируется распространение подхода на случай многопоточного режима для группы ТЛР. В дальнейшем предполагается реализовать: агрегирование индивидуальных расписаний [6] с учетом предпочтений и находить оптимальное групповое расписание как ранжирование консенсуса индивидуальных расписаний [7]; учет наличия материальных ресурсов при оценивании возможности выполнения работ; вычисление ценности работы с учетом внешних факторов и неопределенностей. Результаты этих исследований позволят построить программную модель для оценки качества стратегий управления проектами.

Список литературы

1. Kukhnavets P. What Causes Construction Project Delays: 9 Reasons that Make Work Fall Behind Schedule. – URL: <https://blog.ganttpro.com/en/reasons-for-construction-project-delays> (дата обращения: 05.11.2024).
2. Five Challenges in Meeting Construction Deadlines. – URL: <https://blog.constructionmarketingassociation.org/5-challenges-meeting-construction-deadlines-solve> (дата обращения: 05.11.2024).
3. 75 % of US Construction Firms Encounter Rework Twice a Week. – URL: <https://www.xyzreality.com/resources/construction-nightmares-report-reveals-75-of-us-companies-encounter-rework-at-least-twice-a-week> (дата обращения: 05.11.2024).
4. Martello S., Toth P. Knapsack Problems: Algorithms and Computer Implementation. – Chichester, John Wiley & Sons, 1990. – 296 p.
5. Lawler E.L. Knapsack-like scheduling problems, the Moore-Hodgson algorithm and the «tower of sets» property // Mathematical and Computer Modelling. – 1994. – V. 20, № 2. – P. 91–106.
6. Сидоренко А.М., Хоботов Е.Н. Агрегирование при планировании работ на машиностроительных предприятиях // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2013. – № 5. – С. 132–144.
7. Муравьев С.В., Борисова М.А. Агрегирование предпочтений в интерпретации данных энергетических обследований // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329, № 12. – С. 155–163.