

УДК 004.89

DOI 10.52575/2687-0932-2024-51-3-682-698

## Обзор задачи оптимизации планирования строительных работ на основе модели сетевого графа

Омельченко Д. Ю.

Севастопольский государственный университет,  
Россия, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33  
E-mail: den2om@mail.ru

**Аннотация.** На современном этапе развития деятельности человека в сфере строительства более остро возникает вопрос эффективности планирования строительных проектов и скорости их проработки. Существующие методы решения задач планирования в основе опираются на классическое представление строительных проектов в рамках моделей сетевого планирования и управления, а также классические методы решения задачи сетевого планирования. В связи с недостатком исследований на тему применения методов машинного обучения для решения прикладных задач сетевого планирования, в рамках существующего программного комплекса по управлению строительными работами предложен метод преобразования прикладной модели строительного планирования для применения классических методов и методов с использованием машинного обучения. В рамках исследования проведен обзор задачи оптимизации планирования строительного проекта и подготовлен алгоритм преобразования прикладного строительного проекта в модель сетевого графа. Сформулированы основные правила и принципы преобразования моделей с учетом прикладных ограничений, используемых на производстве.

**Ключевые слова:** сетевое планирование, строительный проект, PERT, сетевая модель, строительная работа, фиктивная работа, модель работа-связь, модель событие-работа, модель событие, задержка

**Для цитирования:** Омельченко Д.Ю. 2024. Обзор задачи оптимизации планирования строительных работ на основе модели сетевого графа. Экономика. Информатика, 51(3): 682–698. DOI 10.52575/2687-0932-2024-51-3-682-698

---

## Review of Construction Project Scheduling Optimization Based on Network Graph Model

Denis Y. Omelchenko

Sevastopol State University  
33 Universitetskaya St, Sevastopol 299053, Russia  
E-mail: den2om@mail.ru

**Abstract.** At the current stage of the construction industry, effective planning and swift project execution are crucial. Traditional planning methods rely on classical network planning and management models. Due to the lack of research on applying machine learning to network planning, a method has been proposed to transform an applied construction planning model for using both classical and machine learning methods. This study reviews the optimization problem of construction project scheduling and develops an algorithm for converting an applied project into a network graph model. The main rules and principles for model transformation, considering practical constraints in production, are formulated. The construction industry today faces significant challenges in improving the efficiency of project planning and execution speed. Existing methodologies typically rely on classical network planning models. However, there is a gap in research regarding the use of machine learning for network planning. To address this, the proposed method enhances construction management by integrating classical and machine learning approaches for transforming planning models. This research reviews construction project scheduling optimization and introduces an algorithm to convert projects into network graph models, outlining essential transformation rules and principles to accommodate industry constraints.

**Keywords:** network planning, construction project, PERT, network model, construction work, fictitious work, work-communication model, event-work model, event model, delay

**For citation:** Omelchenko D.Y. 2024. Review of Construction Project Scheduling Optimization Based on Network Graph Model. Economics. Information technologies, 51(3): 682–698 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2024-51-3-682-698

## Введение

Современные системы управления строительными работами представляют огромное количество возможностей для планирования работ с учетом множества различных параметров. Существует большое количество разнообразных систем планирования и учета выполнения работ. Эти системы выполняют как простые функции – учет материалов и трудовых ресурсов, так и более сложные – определение плана выполнения работ и отслеживание соблюдения сроков выполнения. Во многих существующих сервисах и учетных программах реализованы алгоритмы планирования выполнения работ по заданным критериям. Но в процессе планирования выполнения работ необходимо учитывать не только основные параметры работ, но и особенности задействования трудовых ресурсов.

Задача планирования является одной из самых востребованных в процессе выполнения строительства. От правильности и качества построения плана работ зависит не только скорость строительства, но и итоговое качество выполнения работ, а также эффективность задействования трудовых ресурсов.

Планирование строительных работ относится к методам сетевого планирования и управления (СПУ). Система методов СПУ – система методов планирования разработки крупных комплексов, научных исследований, конструкторских или технологически сложных проектов, состоящих из множества этапов и отдельных элементов путем применения сетевых графов. Основными системами, применяемыми в решении задач СПУ, являются метод критического пути (СРМ) и метод оценки и обзора программы (PERT).

### Основные понятия сетевой модели планирования

Система СПУ позволяет формировать календарный план реализации комплекса работ, выявлять резервы времени и ресурсов, осуществлять управление комплексом работ и повышать эффективность управления между руководителями разного уровня управления [Абдуллаев, 2011].

Планирование и оптимизация строительных работ полностью относятся к классу задач сетевого планирования и управления. Рассмотрим подробнее основные понятия СПУ и их применение к рассматриваемой предметной области.

Сетевая модель представляет собой план выполнения некоего комплекса взаимосвязанных работ (операций), заданного в виде сети, графическое отображение которой называется сетевым графом. Особенностью данной модели является четкое определение всех временных взаимосвязей предстоящих работ. Применимо к предметной области строительства сетевой моделью является календарный план-график выполнения строительных работ с учетом временных и ресурсных затрат [Поспелов, Тейман, 1963; Мушруб и др., 2018].

Действительная работа в рамках СПУ полностью соответствует понятию работы предметной области, это протяженный во времени процесс, требующий затраты ресурсов и времени на выполнение.

Работа-ожидание – протяженный во времени процесс, не требующий затрат труда и ресурсов, но имеющий некую длительность. Данный вид работ используется в случаях необходимости введения задержки между событиями графика.

Зависимость (фиктивная работа) – логическая связь между двумя или несколькими работами (событиями), не требующими затрат труда, ресурсов или времени. Зависимость определяет, что возможность выполнения одной работы непосредственно зависит от результатов другой.

Событие – момент завершения какого-либо процесса, отражающий отдельный этап выполнения проекта. Событие может быть результатом отдельной работы или суммарным результатом нескольких работ (этапом), событие может быть совершено только тогда, когда завершены все работы, предшествующие ему. Последующие работы могут начинаться только после того, как событие свершится.

Отсюда двойственный характер событий: для всех непосредственно предшествующих ему работ оно является конечным, а для всех непосредственно следующих за ним – начальным. Среди всех событий сетевой модели выделяют два особых типа – исходное и завершающее. Исходное событие не имеет предшествующих работ и событий, а завершающее не имеет последующих работ и событий [Логунова, Аркулис, 2021].

Выделяют два основных подхода при построении сетевой модели «работы-связи» и «события-работы». Отличием данных моделей является представление графа, в варианте представления «работы-связи» вершинами графа являются непосредственно выполняемые работы, а дугами являются зависимости между работами «рис. 1а». Такое представление удобно для наглядного восприятия и простого понимания конечного пользователя, а также не содержит фиктивные работы.

Альтернативный вариант «события-работы» является вариантом представления события как вершины графа и работы как дуги «рис. 1б». Отличительной чертой является то, что представление «события-работы» может быть значительно оптимизировано путем объединения результатов нескольких связанных работ в этап (событие), тем самым значительно сокращает сложность сети (сложность сети определяется как отношение числа работ к числу событий). На представленном рисунке работы обозначены как R1-R7, а события плана S1-S7.

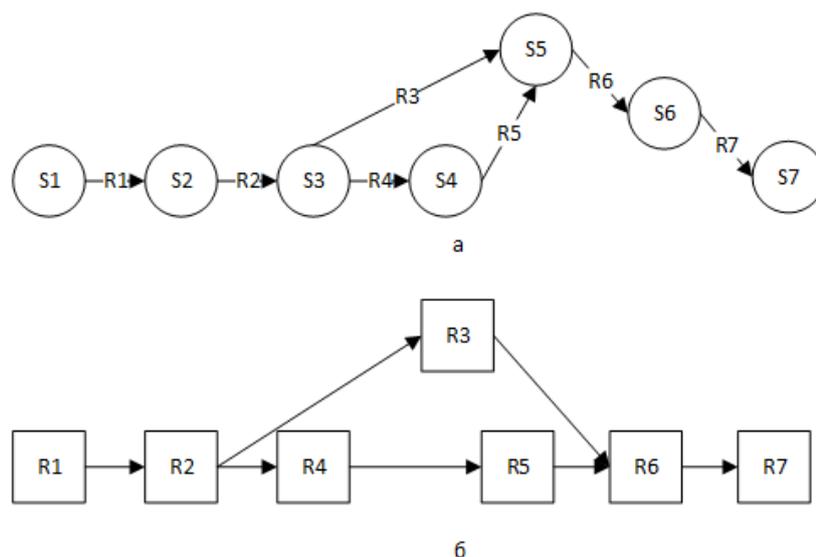


Рис. 1. Варианты представления сетевого графа  
Fig. 1. Options for representing a network graph

Оба варианта представления являются взаимосвязанными и могут быть конвертированы в процессе планирования.

## Математическая модель сетевого графа

Важнейшее понятие сетевого графа – понятие пути. Путь – любая последовательность работ, в которой конечное событие каждой работы совпадает с начальным событием следующей за ней работы. Путь, который занимает наибольшее количество времени, называется критическим.

Представление сетевого графа не дает наглядного понимания масштаба времени, необходимого для выполнения работ. Для решения данной задачи для малых проектов применяют линейную диаграмму проекта. Данное представление позволяет наглядно оценить критическое время, критический путь и резерв времени для всех работ [Олейникова, 2013].

Рассмотрим расчет временных параметров для событий сетевого графа.

Событие не может наступить раньше, чем свершились все предшествующие работы. Минимальный ранний срок  $t_p(i)$  выполнения  $i$ -го события определяется продолжительностью максимального пути, предшествующего этому событию:

$$t_p(i) = \max_{L_{ni}} t(L_{ni}),$$

где  $L_{ni}$  – любой путь, предшествующий  $i$ -му событию, то есть путь от исходного до  $i$ -го события сети.

Если событие  $j$  имеет несколько путей, а, следовательно, и несколько предшествующих событий  $i$ , то ранний срок выполнения события  $j$  определяется формулой:

$$t_p(j) = \max_{i,j} [t_p(i) + t(i, j)].$$

Крайний срок выполнения  $t_n(i)$  события  $i$  равен:

$$t_n(i) = t_{kr} - \max_{L_{ci}} t(L_{ci}),$$

где  $L_{ci}$  – любой путь, следующий за  $i$ -м событием, то есть путь от этого события до завершающего события сети.

Если событие  $i$  имеет несколько последующих путей, а, следовательно, и несколько последующих событий  $j$ , тогда поздний срок выполнения события  $i$  определяется формулой:

$$t_n(i) = \min_{i,j} [t_n(j) - t(i, j)].$$

Резерв времени  $R(i)$   $i$ -го события определяется как разность между поздним и ранним сроками его свершения:

$$R(i) = t_n(i) - t_p(i).$$

Резерв времени отражает, насколько можно задержать выполнение события без нарушения выполнения других работ графика.

Критические работы резерва времени не имеют, любая задержка для такой работы приводит к увеличению задержки для завершающего события.

Следовательно, для определения длины и топологии критического пути сетевого графа не обязательно перебирать все полные пути графа и определять их длины. Определение раннего срока наступления завершающего события сети позволяет определить длину критического пути, а выявление события с нулевым резервом времени определяет топологию критического пути [Кремер и др., 2016].

Временные параметры работ сетевого графа определяются следующим образом.

Ранний срок  $t_{pn}(i, j)$  начала работы  $(i, j)$  совпадает с ранним сроком наступления начального (предшествующего) события  $I$  и определяется соотношением:

$$t_{pn}(i, j) = t_p(i).$$

В таком случае ранний срок  $t_{po}(i, j)$  окончания работы  $(i, j)$  вычисляется по формуле:

$$t_{po}(i, j) = t_p(i) + t(i, j).$$

При этом необходимо понимать, что ни одна работа не может закончиться позже допустимого позднего срока своего конечного события  $i$ . Тогда поздний срок  $t_{no}(i, j)$  окончания работы  $(i, j)$  определяется соотношением:

$$t_{no}(i, j) = t_s(j),$$

а поздний срок  $t_{ns}(i, j)$  начала этой работы – соотношением:

$$t_{ns}(i, j) = t_s(j) - t(i, j).$$

Таким образом, в рамках сетевой модели моменты начала и окончания работы связаны с соседними событиями-ограничениями.

Все не критические пути в сетевом графе обладают резервом времени пути. Резерв времени пути  $R(L)$  определяется как разность между длинами критического и рассматриваемого пути:

$$R(L) = t_{kr} - t(L).$$

Данный резерв отражает запас времени, на которое в сумме может быть увеличено время выполнения входящих в него работ без изменения времени выполнения всего проекта. В случае превышения такого изменения полученной разницы путь  $L$  становится критическим.

Полный резерв времени  $R_n(i, j)$  работы  $(i, j)$  показывает, насколько можно увеличить время выполнения данной работы, при условии, что время выполнения всего графика не будет изменено. Данный резерв вычисляется по формуле:

$$R_n(i, j) = t_n(j) - t_p(i) - t(i, j).$$

Частный резерв времени первого вида  $R_1$  работы  $(i, j)$  есть часть полного резерва времени, на которую можно увеличить продолжительность работы, не изменив при этом позднего срока ее начального события, которая находится по формулам:

$$R_1(i, j) = t_n(j) - t_n(i) - t(i, j),$$

$$R_1(i, j) = R_n(i, j) - R(i).$$

Частный резерв времени второго вида или свободный резерв времени  $R_c$  работы  $(i, j)$  представляет часть полного резерва времени, на которую можно увеличить продолжительность работы, не изменяя раннего срока ее окончания. Определяется по формулам:

$$R_c(i, j) = t_p(j) - t_p(i) - t(i, j),$$

$$R_c(i, j) = R_n(i, j) - R(j).$$

Независимый резерв времени  $R_f(i, j)$  работы  $(i, j)$  – часть полного резерва времени, для случая, когда все предшествующие работы заканчиваются в поздние сроки, а все последующие работы начинаются в ранние сроки:

$$R_f(i, j) = t_p(j) - t_n(i) - t(i, j),$$

$$R_f(i, j) = R_n(i, j) - R(i).$$

Частный резерв времени первого вида может быть использован на увеличение продолжительности данной и последующих работ без затрат резерва времени предшествующих работ, а свободный резерв времени – на увеличение продолжительности

данной и предыдущих работ без нарушения резерва времени последующих работ. Независимый резерв может быть использован только для увеличения продолжительности данной работы [Kelly, Walker, 1959].

Работы, входящие в критический путь, как и события критического пути не имеют резерва времени. По работам без резерва времени может быть определен критический путь.

Дополнительно определим соотношения для проверки расчетов резерва времени отдельных работ.

Если на критическом пути лежит начальное событие  $i$ , тогда:

$$R_n(i, j) = R_1(i, j).$$

Если на критическом пути лежит конечное событие  $j$ , тогда:

$$R_n(i, j) = R_c(i, j).$$

Если на критическом пути лежат начальное и конечное событие  $i$  и  $j$ , но сама работа не принадлежит этому пути, то:

$$R_n(i, j) = R_1(i, j) = R_c(i, j) = R_f(i, j).$$

### Правила построения сетевого графа

Сетевой граф представляет полную схему выполнения строительного проекта с учетом всех связей и ограничений. С помощью графа выполняется поиск критического пути и резерва времени для выполнения строительного проекта.

При построении сетевого графа необходимо соблюдать ряд правил [Мун, Копту, 2019; Mishakova et al. 2017]:

1. В сетевой модели не должно быть событий, из которых не выходит ни одна работа, кроме завершающего события;
2. В сетевом графе не должно быть событий, у которых нет предшественников, кроме начального события;
3. В сети не должно быть замкнутых контуров и петель, в рамках которых события связаны с самими собой через промежуточные события;
4. Любые два события могут быть связаны только одной работой;
5. В сети рекомендуется иметь только одно исходное и одно завершающее событие.

Для установки зависимостей (связей) между работами для каждой работы задается список работ «предшественников» с указанием типа зависимости между текущей работой и указанным «предшественником». Всего выделено четыре типа зависимостей: окончание-начало, окончание-окончание, начало-начало, начало-окончание [Брусенцова, Смелов, 2011; Ishmetyev E. et al 2016]. Данные типы зависимостей являются упрощенным представлением зависимостей СПУ для конечного пользователя системы, расчет зависимостей завязан в первую очередь на конечные даты планового выполнения работ.

Рассмотрим более подробно типы зависимостей:

1. Окончание-начало (ОН) – дата окончания работы предшественника равна дате начала рассматриваемой работы;
2. Окончание-окончание (ОО) – дата окончания работы предшественника равна дате окончания рассматриваемой работы;
3. Начало-начало (НН) – дата начала работы предшественника равна дате начала текущей работы;
4. Начало-окончание (НО) – дата начала работы предшественника равна дате окончания текущей работы.

Перечисленные зависимости определяют связи между работами в понятной для пользователя терминологии, опираясь на даты выполнения работ для удобства восприятия. Также дополнительно к зависимости может применяться некоторая задержка, которая определяет временное смещение, которое применяется при расчете работы, смещение

может быть отрицательным и положительным значением в часах или днях [Дубровская и др., 2021].

В рамках модели сетевого планирования представление предшественников и зависимости описывает связи между работами, при этом зависимость определяет направление связи работы на графе «рис. 2». Задержка между работой и предшественником в терминологии СПУ является работой-ожиданием, которая не требует ресурсов, но требует времени на свое выполнение.

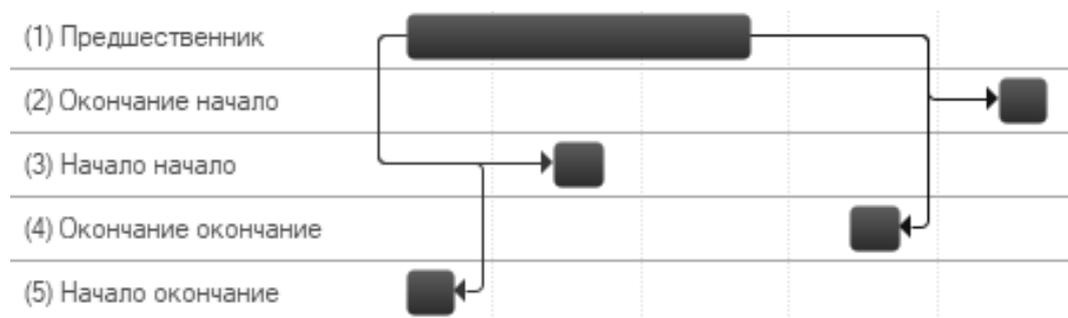


Рис. 2. Представление зависимостей работ и предшественников на диаграмме работ  
Fig. 2. Representing work dependencies and predecessors in a work diagram

К перечисленным зависимостям дополнительно вводится система ограничений при расчете дат планирования:

1. Фиксированное начало – дата начала фиксируется датой ограничения и не изменяется при расчете проекта. Дата окончания рассчитывается от зафиксированной даты начала.

2. Фиксированное окончание – дата окончания фиксируется датой ограничения и не изменяется при расчете проекта. Дата начала рассчитывается с учетом ограничения по дате окончания в обратном направлении.

3. Как можно раньше – дата ограничения не учитывается, из предшественников выбирается самая ранняя работа как точка расчета текущей работы.

4. Как можно позже – дата ограничения не учитывается, из предшественников выбирается самая поздняя работа как точка расчета текущей работы.

5. Начало не ранее – выполняем расчет даты начала по предшественникам. Если полученная дата начала меньше даты ограничения, то дата начала устанавливается датой ограничения, иначе берем полученную дату по расчету.

6. Начало не позднее – выполняем расчет даты начала по предшественникам. Если полученная дата больше даты ограничения, то дата начала устанавливается датой ограничения, иначе используем рассчитанную дату.

7. Окончание не ранее – выполняем расчет даты окончания в зависимости от предшественников. Если полученная дата меньше даты ограничения, то устанавливаем дату окончания – значение даты ограничения, иначе используем дату, рассчитанную по предшественникам.

8. Окончание не позднее – выполняем расчет даты окончания в зависимости от предшественников. Если полученная дата больше даты ограничения, то устанавливаем дату окончания – значение даты ограничения, иначе используем дату, рассчитанную по предшественникам.

Совокупность системы предшественников и ограничений вводят дополнительные зависимости и связи, а также исключают некоторые из связей при расчете проекта путем ввода особых ограничений [Быстров М. И, 2005; Булавчук, Семенов, 2022].

## Преобразование строительного проекта в сетевой граф

Представление сетевого графика в виде модели «работы-связи» обладает явным преимуществом перед представлением «события-работы» для человеческого восприятия, так как не содержит фиктивных работ и имеет более понятную исполнителю технику построения и перестройки. Но также данный вариант представления имеет ряд недостатков основные из которых громоздкость и сложность решения оптимизационных задач. Показатель сложности сети определяется отношением числа работ к числу событий, как правило существенно больше единицы [Евланников, 2016; Kalugin et al, 2018].

Рассмотрим преобразование представления строительного проекта из варианта «работа-связь» к представлению «событие-работа» на примере упрощенного проекта строительства коттеджного дома.

Рассматриваемый проект состоит из десяти строительных работ, связанных между собой разными зависимостями с задержками. В проекте использованы все виды зависимостей предшественников, для упрощенного восприятия в примере используются только по одному предшественнику для работы, в более сложном проекте каждая работа может иметь количество предшественников  $N - 1$ , где  $N$  – количество работ проекта.

Общее представление проекта строительных работ приведено в табл. 1, рассмотрим подробнее используемые зависимости между работами.

Таблица 1  
Table 1

Проект строительных работ  
Construction project

Код Code	Работа Work	Длительность Duration	Предшественник Predecessor	Зависимость Addiction	Задержка Delay
1	Проведение полевых исследований	6	2	ОН	-5
2	Получение технического задания	4	0	ОН	0
3	Подготовка основания фундамента	3	3	ОН	0
4	Заливка фундамента	5	3	ОО	5
5	Строительство стен	8	4	ОН	3
6	Сборка кровли	3	5	ОН	0
7	Установка оконных проемов	2	5	НО	7
8	Установка окон	2	7	НН	4
9	Установка дверных проемов	2	5	НО	7
10	Установка дверей	2	9	НН	3

Одним из наиболее удобных способов визуализации строительных проектов является представление в виде диаграммы Ганта, рис. 3, в таком представлении каждая работа проекта представляется на временной шкале как столбец, а связи между работами представлены в виде стрелок.

Рассмотрим процесс построения сетевого графа на примере рассматриваемого строительного проекта.

Введем начальное событие  $S_0$ , которое будет соответствовать началу проекта, это начальная точка графа – единственное событие, которое не имеет предшественника. Также в графе должно быть завершающее событие, которое обозначим  $SE$ , данное событие не

имеет следующих за ним работ, предшественником события являются все работы, которые не имеют последователя. Построение графа будет выполняться в несколько итераций.

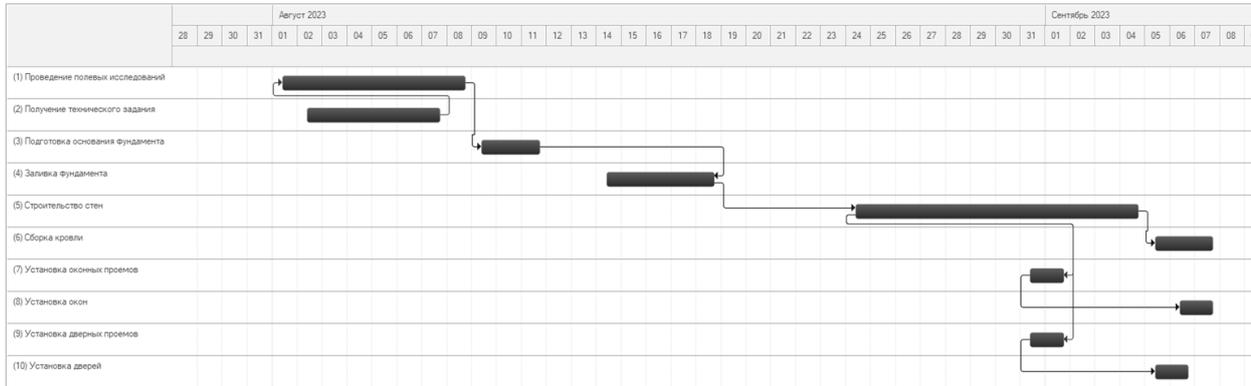


Рис. 3. Диаграмма Ганта строительного проекта  
 Fig. 3. Construction Project Gantt Chart

Единственная работа без предшественников в рассматриваемом графике – это работа под номером R2 «Получение технического задания», дата начала данной работы зависит только от начала самого проекта и от фиксированной даты начала, которую устанавливает пользователь. Такая работа имеет ограничение «Фиксированное начало», для реализации на графе такого ограничения необходимо добавить работу задержку от события начала графика S0 до события начала работы S2s, в данном примере длиной 6. Также для работы добавим событие завершения работы S2f, которое соединено с событием старта дугой длиной 4, рис. 4.



Рис. 4. Построение сетевого графа, итерация 2  
 Fig. 4. Construction of a network graph iteration 2

Работа под номером R1, имеет прямую зависимость от работы R2, но при этом указана задержка -5 которая больше, чем длительность работы 2 «Получение технического задания». Такой пример связи создает ситуацию что работа последователь начинается и заканчивается позже, чем ее предшественник, что наглядно видно на диаграмме Ганта, рис. 2. Результат добавления работы без преобразования задержки представлен на рис. 5.

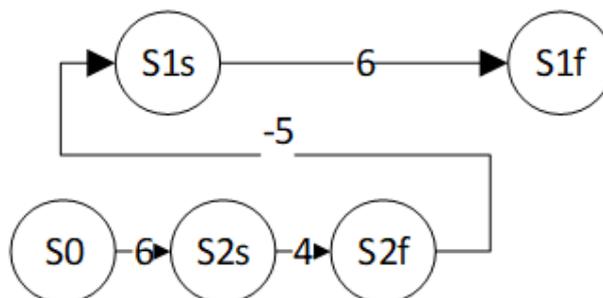


Рис. 5. Построение сетевого графа, итерация 3  
 Fig. 5. Construction of a network graph iteration 3

Работа «Подготовка основания фундамента» под номером R3, имеет зависимость от работы 1 и нулевую задержку при связи окончание-начало. В свою очередь работа R4 имеет зависимость окончание-окончание и зависит уже от работы R3 с задержкой, равной 5. Добавим работы по очереди в граф проекта, рис. 6.

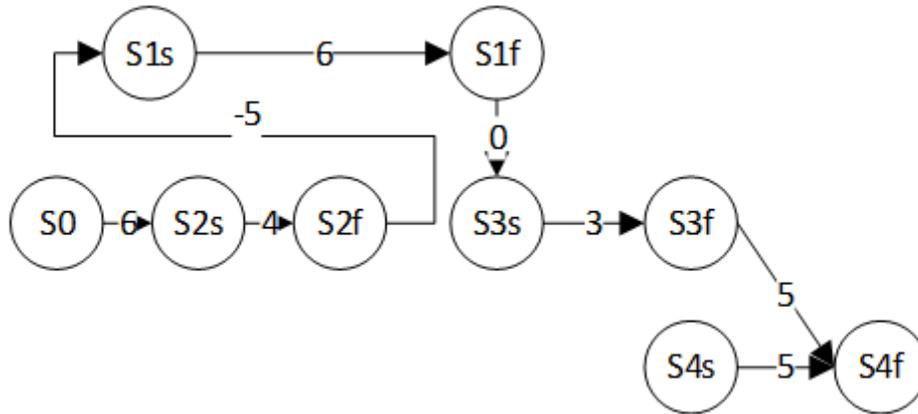


Рис. 6. Построение сетевого графа, итерация 5  
Fig. 6. Construction of a network graph iteration 5

Следующая работа R5 «Строительство стен» зависит от работы «Заливка фундамента», но перед началом выполнения работы необходимо дождаться завершения застывания фундамента, поэтому для работы указана задержка, равная 3. На данном этапе имеем три работы без предшественников, которые еще не добавлены в граф, работы R6, R7 и R9.

Работа R6 «Сборка кровли» выполняется без задержки сразу после завершения работы 5. Работа R7 «Установка оконных проемов» и работа R9 «Установка дверных проемов» имеют задержку 7 и тип зависимости начало-окончание, рис. 7.

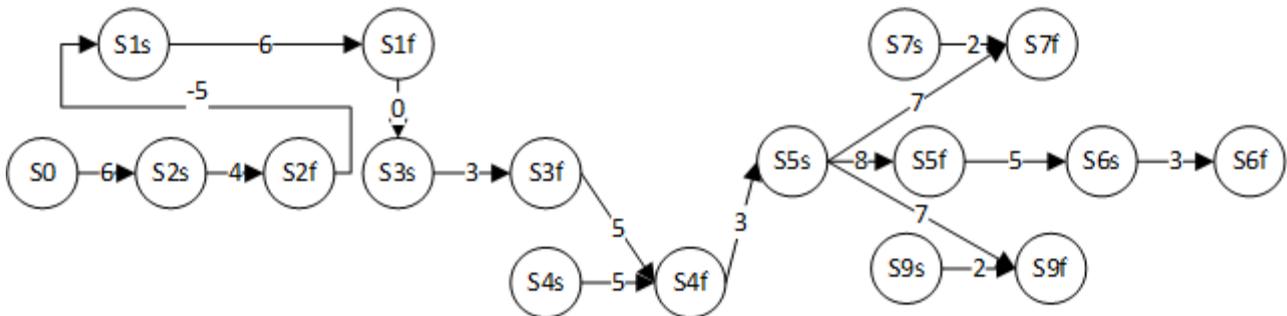


Рис. 7. Построение сетевого графа, итерация 9  
Fig. 7. Construction of a network graph iteration 9

Работы без предшественников, которые необходимо добавить в граф, это R8 «Установка окон» и R10 «Установка дверей». Для работы R8 задержка равна 4 при связи начало-начало, для работы R10 задержка 3 и связь начало-начало.

Все работы проекта добавлены в сетевой граф, для работ R8, R6 и R10 нет последующих работ, добавим закрывающее событие SE, связанное с работами. Получим итоговый вариант сетевого графа, рис. 8.

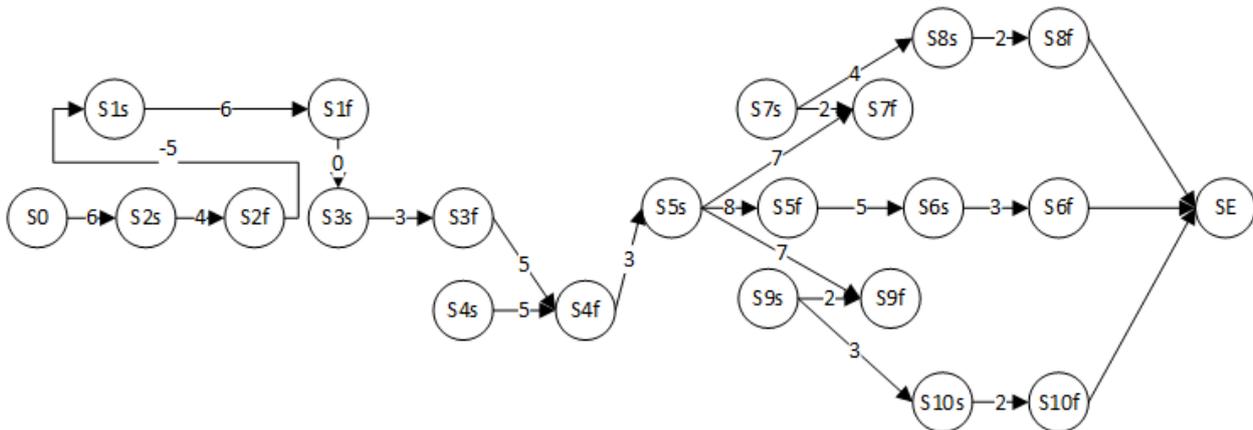


Рис. 8. Итоговый сетевой граф  
 Fig. 8. The resulting network graph

Полученный сетевой граф нарушает требования по построению сетевого графа, вершины S4s, S7s и S9s не имеют предшественников. Данные события связаны с работами R4, R7 и R9, у которых установлены типы зависимости НО и ОО. Для устранения таких ситуаций введем правило преобразования для данных типов зависимостей.

**Правило преобразования 1:** если тип зависимости от работы предшественника НО или ОО – добавляется фиктивная работа НН и ОН соответственно. Длительность новой задержки определяется как задержка минус длительность добавляемой работы, целевым событием становится начало добавляемой работы.

Применим данное преобразование к сетевому графу для устранения нарушения второго правила построения сетевого графа, рис. 9.

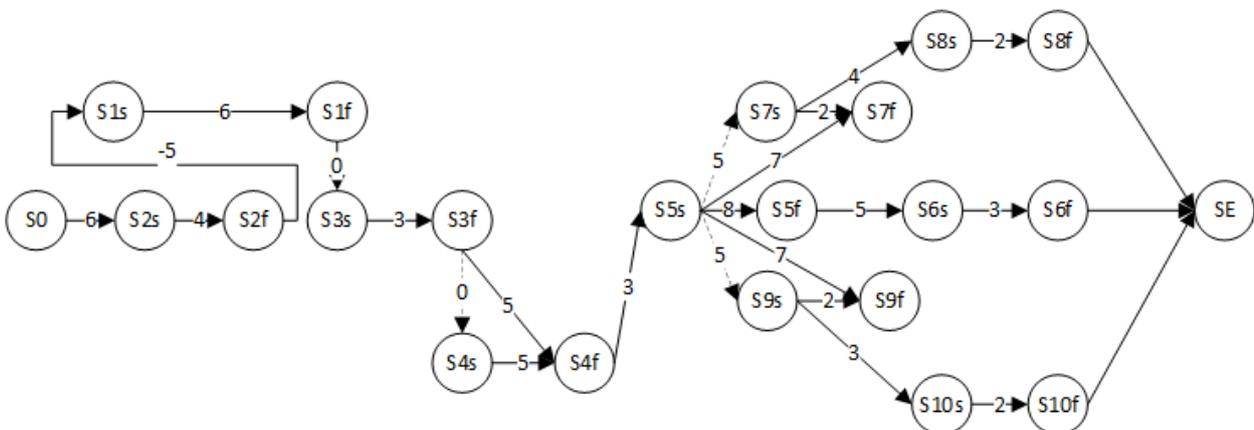


Рис. 9. Преобразование зависимостей НО и ОО  
 Fig. 9. Converting NO and OO dependencies

В сетевом графе также нарушено правило, что в сети не должно быть событий, из которых не выходит ни одна из работ, кроме завершающего события, такими событиями в примере являются S7f и S9f. Данным событиям соответствуют работы R7 и R9, работы имеют последователей, которые от них зависят через тип связи НН. Для устранения таких ситуаций введем правило преобразования для данных типов зависимостей.

**Правило преобразования 2:** если тип зависимости от работы предшественника НН – добавляется фиктивная работа ОН. Длительность новой задержки определяется как задержка существующей связи минус длительность работы предшественника, целевым событием становится начало добавляемой работы.

Применим данное преобразование к сетевому графу для устранения нарушения первого правила построения сетевого графа, рис. 10.

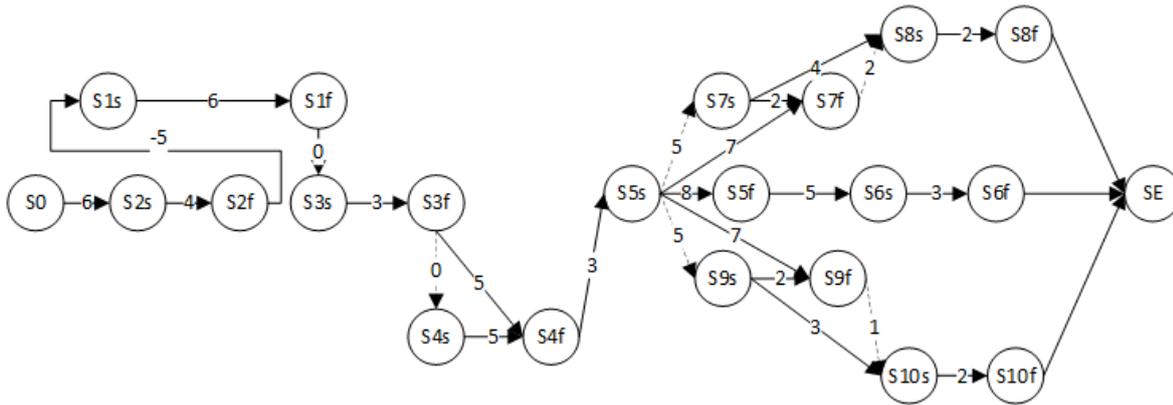


Рис. 10. Преобразование зависимостей НН  
Fig. 10. Transforming NN dependencies

Еще одной проблемой в полученном сетевом графе является наличие дуги с отрицательной длиной, существование такой дуги возможно в рамках решения задачи планирования, но противоречит правилам построения сетевого графа, так как длина пути не может быть отрицательной. Для устранения данной проблемы выполним преобразование по следующему правилу.

**Правило преобразования 3:** если задержка между событиями меньше 0, тогда дуга графа становится запрещенной, для построения маршрута, связь становится условием контроля проекта.

Добавляем новую основную зависимость, если зависимость между работами была ОН или ОО, тогда зависимость добавляемой работы последователя переносится на начальное событие работы предшественника, длина дуги определяется как длительность работы предшественника плюс задержка.

Если зависимость между работами НО или НН, тогда для работы предшественника вводится дополнительное событие перед начальным событием. Длина дуги между новым вспомогательным событием и стартовым событием предшественника равна модулю от отрицательной задержки. От полученного события добавляем зависимость к работе последователю и дугу с длиной 0.

Результат преобразования приведен на рис. 11, тут и в дальнейшем жирными дугами обозначены запрещенные пути, которые являются ограничениями корректного расчета проекта.

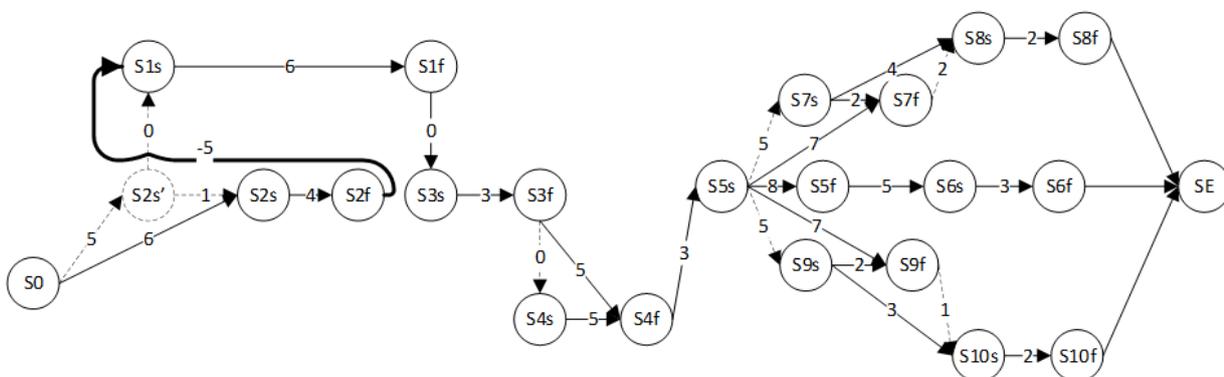


Рис. 11. Преобразование отрицательной задержки  
Fig. 11. Negative delay conversion

Полученный сетевой граф может быть использован для поиска кратчайшего пути и оптимизации сетевого графа. Но в рассмотренном примере явно не разобраны

дополнительные ограничения, которые могут быть установлены для работ [Вагулина, Важинский, 2022].

Рассмотрим более подробно, как на сетевом графе должны отражаться зависимости от ограничений, на примере фрагмента сетевого графа, рис. 12.

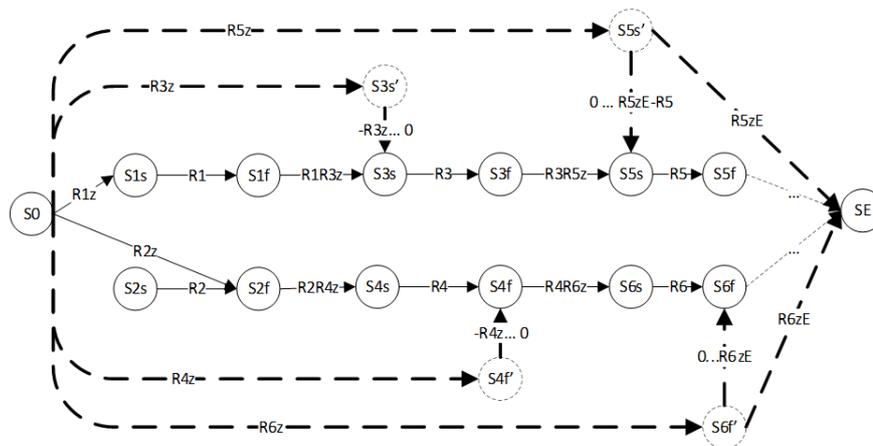


Рис. 12. Представление ограничений по работам на фрагменте сетевого графа  
 Fig. 12. Representation of work restrictions on a fragment of a network graph.

**Правило преобразования 4:** для работы R1 установлено ограничение «Фиксированное начало», для данного ограничения на графе вводится зависимость от начальной точки проекта S0 к началу события работы S1s, длина дуги R1z равняется задержке от даты начала проекта до даты ограничения.

**Правило преобразования 5:** для работы R2 установлено ограничение «Фиксированное окончание», для данного ограничения на графе вводится зависимость от начальной точки проекта S0 к событию окончания S2f работы, длина дуги R2z равняется задержке от даты начала проекта до даты ограничения.

**Правило преобразования 6:** работа R3 имеет ограничение «Начало не позднее», для данного ограничения необходимо добавить вспомогательное событие S3s', событие соответствует дате ограничения, установленной для работы, которое зависит от начального события проекта. Длина дуги R3z равняется задержке от даты начала проекта до даты ограничения. Между воспитательным событием S3s' и основным S3s устанавливается задержка, которая может принимать значение на интервале от -R3z до 0. Все добавленные события и дуги не могут быть использованы для построения пути, а в графе выполняют роль ограничений.

Работа R4 имеет ограничение «Окончание не позднее», для данного ограничения необходимо добавить вспомогательное событие S4f', событие соответствует дате ограничения, установленной для работы, которое зависит от начального события проекта. Длина дуги R4z равняется задержке от даты начала проекта до даты ограничения. Между воспитательным событием S4f' и основным S4f устанавливается задержка, которая может принимать значение на интервале от -R4z до 0. Все добавленные события и дуги не могут быть использованы для построения пути, а в графе выполняют роль ограничений.

**Правило преобразования 7:** для работы R5 установлено ограничение «Начало не ранее», для данного ограничения необходимо добавить вспомогательное событие S5s', событие соответствует дате ограничения, установленной для работы, которое зависит от начального события проекта. Длина дуги R5z равняется задержке от даты начала проекта до даты ограничения. Между воспитательным событием S5s' и основным S5s устанавливается задержка, которая может принимать значение на интервале от 0 до R5zE – R5. Где R5zE – время от воспитательного события до завершающего события проекта. Все

добавленные события и дуги не могут быть использованы для построения пути, а в графе выполняют роль ограничений.

**Правило преобразования 8:** для работы  $R_6$  установлено ограничение «Окончание не ранее», для данного ограничения необходимо добавить вспомогательное событие  $S_6^f$ , событие соответствует дате ограничения, установленной для работы, которое зависит от начального события проекта. Длина дуги  $R_6z$  равняется задержке от даты начала проекта до даты ограничения. Между воспитательным событием  $S_6^f$  и основным  $S_6$  устанавливается задержка, которая может принимать значение на интервале от 0 до  $R_6zE$ . Где  $R_6zE$  – время от воспитательного события до завершающего события проекта. Все добавленные события и дуги не могут быть использованы для построения пути, а в графе выполняют роль ограничений.

Ограничение «Как можно позже» является стандартным и естественным ограничением, которое говорит о том, что мы должны учитывать самый поздний вариант начала работы от всех предшественников работы. Ограничение «Как можно раньше» приводит к игнорированию всех предшественников, кроме самого раннего предшественника. Данные ограничения на графе не отражаются, а заносятся как дополнительные свойства начинающего события  $S_N$  для работы  $R_N$ .

Общий алгоритм построения сетевого графа выглядит следующим образом:

1. Инициация начального события  $S_0$  и закрывающее событие  $SE$ .
2. Выборка работы  $R_N$ , у которой нет предшественников, которые не внесены в граф.
3. Добавление работы  $R_N$  в граф с соблюдением задержек от предшественников и длины работ.
4. Применение преобразования ограничений по правилам преобразования 4–8.
5. Преобразование отрицательных задержек, если есть такие для работы.
6. Устранение нарушений правил формирования по правилам преобразования 1–3.
7. Ищем работу в списке всех предшественников для всех работ, если работа не является предшественником для любой из работ – добавляем связь с закрывающим событием  $SE$ .
8. Если есть работы, не включенные в сетевой граф, переходим к пункту 2, иначе пункт 9.
9. Завершение построения сетевого графа.

Таким образом, выполняется переход от представления строительного проекта «работа-связь» к виду «событие-работа». Полученный сетевой граф является основой для решения задач сетевой оптимизации различными методами.

### Заключение

В рамках статьи рассмотрена постановка задачи сетевой оптимизации для решения задачи планирования строительных работ. Рассмотрены существующие прикладные ограничения на базе существующего программного продукта для управления строительным производством, применяемые при планировании строительных работ.

Определены базовые принципы преобразования прикладных строительных проектов в сетевые графы планирования. Сформулированы правила построения сетевого графа для строительного проекта и подготовлены правила преобразования нестандартных ограничений на выполнение работ.

В статье рассмотрен пример преобразования прикладного строительного проекта в сетевой граф с приходом представления строительного проекта от вида «работа-связь» к виду «событие-работа». Выделены ключевые этапы преобразования и сложности при работе с дополнительными ограничениями, вводимыми на реальных строительных проектах. В рамках исследования разработан алгоритм преобразования строительного проекта в сетевой граф с учетом ограничений и правил, вводимых в рамках строительного проекта. Сформулированы правила преобразования ограничений и нестандартных связей вида «работа-связь» в «событие-работа».

Перспективами дальнейшего развития исследований является разработка формальной математической модели преобразования и оптимизации сетевого графа с использованием классических методов оптимизации PERT. А также оценки применимости методов машинного обучения для решения задач сетевой оптимизации на примере планирования строительных работ.

### Список литературы

- Абдуллаев Г.И. 2011. Влияние организационно-технологических факторов на эффективность управления строительством сооружений. *Инженерно-строительный журнал*. № 2: 52–54.
- Бовтеев С.В., Еременко В.П. 2004. Управление проектами в строительстве. СПб: Государственный архитектурно-строительный ун-т, 424.
- Брусенцова Т.П., Смелов В.В. 2011. Управление проектами в Microsoft Project. Минск: БГТУ, 160.
- Булавчук А.М., Семенова Д.В. 2022. Календарное планирование инвестиционных проектов в условиях ограниченности ресурсов и неопределённости. *Вестник Томского государственного университета. Экономика*. № 59: 261–274.
- Быстров М.И. 2005. Планирование производства в корпоративной информационной системе и задача объемно-календарного планирования. *Вестник Волжской государственной академии водного транспорта*. № 14: 135–141.
- Вагулина А.А., Важинский В.А., Королев А.С. 2022. Модели и алгоритмы принятия решений при управлении портфелем проектов капитального строительства. *International Journal of Open Information Technologies*. № 8: 121–128.
- Дубровская Т.А., Кравченко И.Н., Стрижак А.И. 2021. Особенности применения программного обеспечения Microsoft Project при расчете календарного плана строительства. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. № 4: 212–224.
- Евланников Д.Л. 2016. Инженерный подход к календарному планированию этапа комплексной отладки программного обеспечения информационно-управляющих систем. *Системы управления и обработки информации*. Вып. 1(32): 66–73.
- Исследование операций в экономике: учебник для академического бакалавриата. 2016. Н.Ш. Кремер, Б.А. Путко, И.М. Тришин, М.Н. Фридман, под ред. Н.Ш. Кремера. 3 изд. Москва: Юрайт, 438.
- Логунова О.С., Аркулис М.Б. 2021. Автоматизированная система оперативного календарного планирования многостадийного производства: математическая модель и программная реализация. *Вестник Череповецкого государственного университета*. № 102: 18–37.
- Мун Де Ен, Копту Л.И. 2019. Система сетевого планирования и управления в современной экономике. *Colloquium-journal*. № 26: С. 176–178. doi:10.24411/2520-6990-2019-10970
- Мушруб В.А., Соболев В.Н., Фомин Г.П. 2018. О сокращении длительности проекта без увеличения затрат. *Инновации и инвестиции*. № 8: 265–270.
- Олейникова С.А. 2013. Критический анализ метода PERT решения задачи управления проектами со случайной длительностью выполнения работ. *Системы управления и информационные технологии*. № 51: 20–24.
- Поспелов Г.С., Тейман А.И. 1963. Автоматизация процессов управления разработками больших систем и сложных комплексов. *Известия АН СССР, Техническая кибернетика*. № 4: 60–79.
- Kalugin, Yu.B., Romanov R.S. 2018. Scheduling workflows for scattered objects. *Magazine of Civil Engineering*, 84: 29–40.
- Mishakova, A.V., Vakhrushkina A.V., Anishchenko D.R. Tatarkina Y.A., 2017. Program evaluation and review technique as the tool for time control. *Magazine of Civil Engineering*, 72: 12–19.
- Ishmetyev E.N., Logunova O.S., Volshchukov Y.N., Makashov P.L., Barankov V.V., Filippov E.G. 2016. On the aspect of implementing solutions for information support of industrial plant control systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 85(5-8): 1779–1791.
- Kelly J.E., Walker M.R. 1959. Critical Path Planning Scheduling. *Proceedings of the Eastern Joint Computer Conference*, Dec. 1-3, 160–173.

### References

- Abdullaev G.I. 2011. Vliyanie organizatsionno-tekhnologicheskikh faktorov na effektivnost' upravleniya stroitel'stvom sooruzheniy [The influence of organizational and technological factors on the

- effectiveness of construction management]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Civil Engineering Magazine]. № 2: 52–54.
- Bovteev S.V., Eremenko V.P. 2004. *Upravlenie proektami v stroitel'stve* [Project management in construction]. SPb: Gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitel'nyy un-t, 424.
- Brusentsova T.P., Smelov V.V. 2011. *Upravlenie proektami v microsoft project* [Project management in microsoft project]. Minsk: BGTU, 160.
- Bulavchuk A.M., Semenova D.V. 2022. *Kalendarnoe planirovanie investitsionnykh proektov v usloviyakh ogranichenosti resursov i neopredelennosti* [Calendar planning of investment projects in conditions of limited resources and uncertainty]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika* [Bulletin of Tomsk State University. Economy]. № 59: 261–274.
- Bystrov M.I. 2005. *Planirovanie proizvodstva v korporativnoy informatsionnoy sisteme i zadacha ob'emno-kalendarnogo planirovaniya* [Production planning in a corporate information system and the task of volume and calendar planning]. *Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta* [Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport]. № 14: 135–141.
- Vagulina A.A., Vazhinskiy V.A., Korolev A.S. 2022. *Modeli i algoritmy prinyatiya resheniy pri upravlenii portfelem proektov kapital'nogo stroitel'stva* [Models and algorithms of decision-making in the management of a portfolio of capital construction projects]. *International Journal of Open Information Technologies*. № 8: 121–128.
- Dubrovskaya T.A., Kravchenya I.N., Strizhak A.I. 2021. *Osobennosti primeneniya programmnogo obespecheniya microsoft project pri raschete kalendarnogo plana stroitel'stva* [Features of using microsoft project software in calculating the construction schedule]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. № 4: 212–224.
- Evlannikov D.L. 2016. *Inzhenernyy podkhod k kalendarnomu planirovaniyu etapa kompleksnoy otladki programmnogo obespecheniya informatsionno-upravlyayushchikh system* [An engineering approach to the scheduling of the stage of complex debugging of information management systems software]. *Sistemy upravleniya i obrabotki informatsii* [Information management and processing systems]. 1(32): 66–73.
- Issledovanie operatsiy v ekonomike: uchebnik dlya akademicheskogo bakalavriata* [Operations Research in Economics: Textbook for Academic Undergraduate Studies]. 2016. N.Sh. Kremer, B.A. Putko, I.M. Trishin, M.N. Fridman, Edited by N.Sh. Kremera. 3 edition Moskva: Yurayt, 438.
- Logunova O.S., Arkulis M.B. 2021. *Avtomatizirovannaya sistema operativnogo kalendarnogo planirovaniya mnogostadiynogo proizvodstva: matematicheskaya model' i programmnaya realizatsiya* [Automated system of operational scheduling of multistage production: mathematical model and software implementation]. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Cherepovets State University]. № 102: 18–37.
- Mun De En, Koptu L.I. 2019. *Sistema setevogo planirovaniya i upravleniya v sovremennoy ekonomiki* [Network planning and management system in the modern economy]. *Colloquium-journal*. № 26: 176–178. doi:10.24411/2520-6990-2019-10970
- Mushrub V.A., Sobolev V.N., Fomin G.P. 2018. *O sokrashchenii dlitel'nosti proekta bez uvelicheniya zatrat* [About reducing the duration of the project without increasing costs]. *Innovatsii i investitsii* [Innovation and investment]. № 8: 265–270.
- Oleynikova S.A. 2013. *Kriticheskiy analiz metoda PERT resheniya zadachi upravleniya proektami so sluchaynoy dlitel'nost'yu vypolneniya rabot* [A critical analysis of the PERT method for solving the problem of project management with a random duration of work]. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii* [Management systems and information technology]. № 51: 20–24.
- Pospelov G.S., Teyman A.I. 1963. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya razrabotkami bol'shikh sistem i slozhnykh kompleksov* [Automation of development management processes for large systems and complex complexes]. *Izvestiya AN SSSR, Tekhnicheskaya kibernetika* [Izvestia of the USSR Academy of Sciences, Technical Cybernetics]. № 4: 60–79.
- Kalugin, Yu.B., Romanov R.S. 2018. *Scheduling workflows for scattered objects*. *Magazine of Civil Engineering*, 84: 29–40.
- Mishakova, A.V., Vakhrushkina A.V., Anishchenko D.R., Tatarkina Y.A., 2017. *Program evaluation and review technique as the tool for time control*. *Magazine of Civil Engineering*, 72: 12–19.
- Ishmetyev E.N., Logunova O.S., Volshchukov Y.N., Makashov P.L., Barankov V.V., Filippov E.G. 2016. *On the aspect of implementing solutions for information support of industrial plant control systems*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 85(5-8): 1779–1791.



Kelly J.E., Walker M.R. 1959. Critical Path Planning Scheduling. Proceedings of the Eastern Joint Computer Conference, Dec. 1-3, 160–173.

**Конфликт интересов:** о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

**Conflict of interest:** no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 08.07.2024

Received July 08, 2024

Поступила после рецензирования 29.08.2024

Revised August 29, 2024

Принята к публикации 06.09.2024

Accepted September 06, 2024

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Омельченко Денис Юрьевич**, аспирант кафедры информационных технологий и компьютерных систем, Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия

**Denis Y. Omelchenko**, Postgraduate Student of the Department of Information Technologies and Computer Systems, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia