

Графические модели календарного планирования поточных проектов

Тихонов Юрий Петрович

Канд. экон. наук, ст. преп. каф. экономики и управления в строительстве
ORCID: 0009-0002-5982-7492, e-mail: up_tihonov@list.ru

Государственный университет управления, г. Москва, Россия

Аннотация

Исследована проблема выбора формы календарного графика для поточных проектов – проектов поточного строительства, реконструкции и капитального ремонта зданий и сооружений. Проведен сравнительный анализ основных графических организационно-технологических моделей, используемых при календарном планировании проектов с поточной организацией работ: линейного календарного графика, циклограммы, сетевого графика. Для каждого из видов моделей выделены ключевые достоинства и недостатки. Рассмотрены некоторые разновидности графических моделей календарного планирования поточных проектов, применяемые за рубежом, – график *line of balance*, циклограмма с масштабированной осью ординат и график *duration-distance*. Предложено развитие модели визуализации поточной организации работ на основе модифицированного варианта графика *duration-distance* – мозаичной циклограммы, которая при всей своей простоте наглядно отображает согласование выполняемых работ в пространстве и времени в рамках поточного метода организации работ. Описаны основные параметры предлагаемого инструмента, обуславливающие его преимущество над классическими способами визуализации календарных графиков поточных проектов. Обосновано мнение, что данный вид графика также возможно применять при планировании других проектов, не связанных с поточной организацией работ. Даны некоторые рекомендации по выбору формы календарного графика для поточных проектов и решению возможных трудностей, которые возникают при его построении.

Ключевые слова

Управление проектом, поточный проект, организация строительства, поточный метод, календарное планирование, линейный календарный график, циклограмма, сетевой график, метод критического пути, мозаичная циклограмма

Для цитирования: Тихонов Ю.П. Графические модели календарного планирования поточных проектов // Вестник университета. 2026. № 1. С. 137-148.



Diagram models for scheduling repetitive projects

Yuriy P. Tikhonov

Cand. Sci. (Econ.), Senior Lecturer at the Economics and Management in Construction Department
ORCID: 0009-0002-5982-7492, e-mail: up_tihonov@list.ru

State University of Management, Moscow, Russia

Abstract

The research examines the problem of choosing a schedule form for repetitive projects – including construction, reconstruction, and major repairs of buildings and structures. A comparative analysis has been conducted on the primary graphical organizational, and technological models used in flow-based scheduling: bar chart, flowline chart, and network diagram; for each type of model, the key advantages and disadvantages have been highlighted. Some types of graphical models of scheduling of repetitive projects used abroad have also been considered – line of balance chart, flowline chart with a scaled ordinate axis and the duration-distance chart. The study proposes to develop a visualization model of the flow organization of work based on a modified version of the duration-distance chart – the mosaic flowline chart, which, despite its simplicity, graphically displays the coordination of the work performed in space and time within the framework of the flow method of work organization. The main parameters of the proposed tool have been described, demonstrating its advantages over classical visualization methods of schedules of repetitive projects. The study substantiates that this type of schedule can also be used for planning other projects not related to the flow organization of work. In conclusion, some recommendations have been given on choosing the form of a schedule for repetitive projects and solving possible difficulties that arise during their development.

Keywords

Project management, repetitive project, construction organization, flow method, scheduling, Gantt chart, flowline chart, network diagram, critical path method, mosaic flowline chart

For citation: Tikhonov Yu.P. (2026) Diagram models for scheduling repetitive projects. *Vestnik universiteta*, no. 1, pp. 137-148.



ВВЕДЕНИЕ

Проекты поточного строительства, реконструкции и капитального ремонта зданий и сооружений являются широко распространенной разновидностью инвестиционно-строительных проектов как в Российской Федерации, так и за рубежом. Поточным методом организации строительного производства возводятся линейные объекты (автомагистрали, туннели, мосты, железные дороги, трубопроводы, канализационные сети), а также высотные здания и жилые комплексы. Поточный метод организации работ также актуален в случае реконструкции и капитального ремонта уже существующих объектов и их комплексов.

На практике не все проекты с повторяющимися аналогичными работами на разных объектах являются поточными, – зачастую работы на каждом отдельном объекте рассматриваются как самостоятельный проект. Однако во многих случаях возможно объединить и эффективно выполнять такие повторяющиеся работы в виде поточных проектов, что позволяет сэкономить время и деньги.

Теория планирования и организации поточного строительства в России развивалась в течение нескольких десятков лет. За это время были разработаны соответствующие инструменты, позволяющие максимально эффективно, то есть быстро и экономно возводить или обновлять объекты и комплексы с помощью поточного метода организации процесса строительного производства. Однако многие проблемы планирования поточных проектов до конца еще не решены.

Ключевые проблемы, возникающие при планировании поточных проектов, можно условно разделить на две группы: проблемы оптимизации потоков, то есть выбора наиболее эффективных вариантов их организации, и проблемы визуализации принимаемых организационно-технологических решений посредством календарных графиков. В данной статье рассматривается вторая группа проблем.

Организация строительно-монтажных или ремонтных работ в поточных проектах предполагает их согласование во времени и пространстве, то есть разработку модели выполнения согласованного во времени и пространстве комплекса работ. Для обеспечения возможности формирования, расчета и оптимизации потоков организационно-технологические модели фиксируются в графической или табличной форме. Табличная форма успешно применяется при расчете сроков выполнения работ в потоках, однако не способна визуализировать сами потоки и их развитие в пространстве и времени. Наглядное представление о последовательности, организационной и технологической взаимосвязи, сроках и темпах выполнения работ в поточных проектах дают графические организационно-технологические модели.

ЦЕЛИ И ГИПОТЕЗЫ

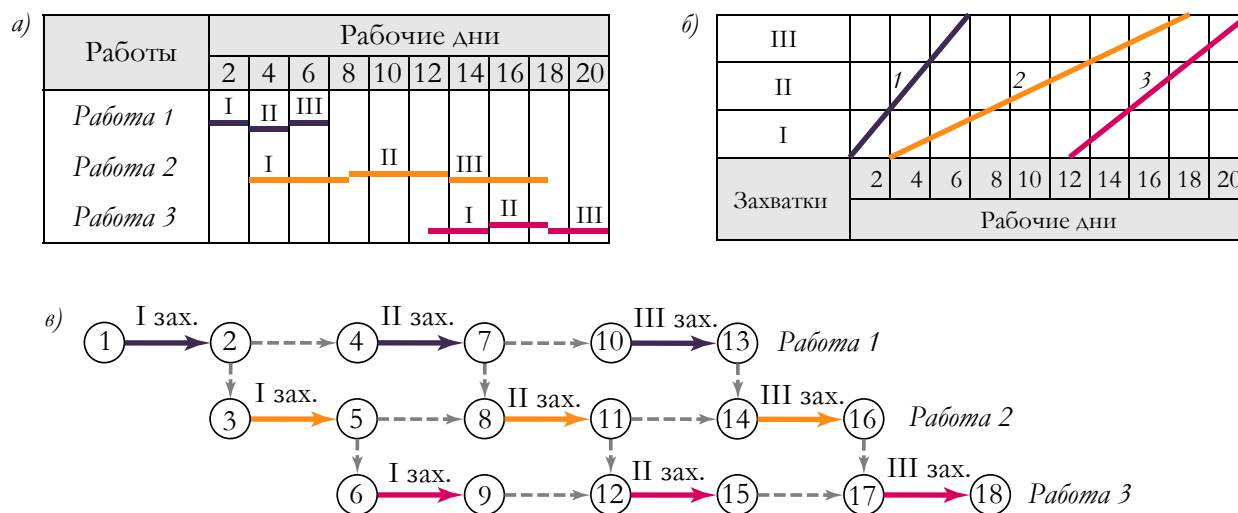
Целью настоящего исследования является поиск наиболее удачного способа визуализации организационно-технологических решений при календарном планировании поточных проектов на основе сравнительного анализа основных используемых в отечественной и мировой практике графических моделей.

Предполагается, что для конкретного поточного проекта выбор формы календарного графика осуществляется с учетом определенных достоинств и недостатков применяемых графических организационно-технологических моделей, в том числе с точки зрения наглядности конечного результата. Также предполагается, что любая применяемая в практической деятельности разновидность графической организационно-технологической модели может быть в той или иной степени усовершенствована с точки зрения наглядности отображения процесса выполнения работ поточным методом во времени.

ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ КЛАССИЧЕСКИХ ГРАФИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ПОТОЧНЫХ ПРОЕКТОВ

Основными документами, в которых находит отражение проектируемая технология и организация строительства, реконструкции, капитального ремонта объектов и комплексов, являются календарные планы-графики, которые составляются на основе различных графических организационно-технологических моделей и являются эффективным средством управления, планирования и организации проектов.

Среди основных графических организационно-технологических моделей организации работ, получивших широкое применение в отечественной практике, можно выделить три инструмента на рис. 1: линейный календарный график, или график Г. Ганта (а), циклограмма М.С. Будникова (б) и сетевой график (в).



Примечание: а – линейный календарный график; б – циклограмма; в – сетевой график типа «работы на дугах» в линейной (ленточной) форме
Составлено автором по материалам исследования

Рис. 1. Графические организационно-технологические модели разноритмичного объектного потока

Первые две модели отражают ход выполнения работ во времени – на оси абсцисс у них расположена шкала рабочего времени. Главная разница между линейным календарным графиком и циклограммой заключается в том, что первый строится в системе ОВР (ордината – виды работ), а циклограмма – в системе ОФР (ордината – фронт работ), то есть линейный календарный график фокусирует внимание на времени начала и окончания каждой отдельной работы, а циклограмма сосредоточивает его на сроках и темпах освоения всего фронта работ как пространства.

Сетевой график показывает взаимосвязь между этапами работ, и, даже если он выполнен в масштабе времени, то есть с добавлением шкалы времени, его предназначение заключается именно в этом. Сетевой график может быть представлен двумя вариантами: «работы на дугах» (англ. activity-on-arrow), где работы отображаются стрелками между кружками событий, и «работы в узлах» (англ. activity-on-node), где работы отображаются в виде квадратов, а связи между ними – в виде стрелок. Второй вариант появился позднее как альтернатива первому и позволяет указывать на графике различные типы зависимостей между работами, но исключение из графика событий, формирующих его логическую основу, мешает планировать и управлять проектом по промежуточным результатам [1]. На наш взгляд, целесообразно применение, особенно при календарном планировании поточных проектов, первого, классического, типа сетевого графика – «работы на дугах».

Как и любые модели, представляющие собой упрощение реальных процессов и явлений, зафиксированное в условиях определенных ограничений, приведенные выше графические организационно-технологические модели имеют свои достоинства и недостатки. Рассмотрим их с точки зрения применения при календарном планировании работ, выполняемых поточным методом (см. таб.).

Таблица

Достоинства и недостатки классических графических организационно-технологических моделей при организации выполнения работ поточным методом

Графический инструмент	Достоинства	Недостатки
Линейный календарный график (график Г. Ганта)	– наглядность: позволяет визуально оценить последовательность работ и их продолжительность; – простота построения, возможность отображения на одном графике всего перечня работ (как основных, так и прочих);	– не отображает резервы времени работ; – трудность или невозможность построения графика для сложных объектов с большим количеством видов работ;

Графический инструмент	Достоинства	Недостатки
Линейный календарный график (график Г. Ганта)	<ul style="list-style-type: none"> – возможность добавления достаточно подробных характеристик видов работ и данных о потребности в ресурсах на каждую единицу времени, вследствие чего можно распределять ресурсы по отдельным работам и объекту в целом; – гибкая структура данных и широкие возможности настройки внешнего вида (возможность задавать цвета); – возможность применения программного обеспечения для выполнения сложных вычислений, а также для выполнения анализа 	<ul style="list-style-type: none"> – при добавлении в график большого количества зависимостей между работами наглядность графика существенно снижается; – при выделении на прямых работ частных фронтов (захваток) наглядность графика также может существенно снизиться; – состав работ и сроки их выполнения обозначаются неоднозначно, вследствие чего корректировка модели плана может быть затруднена
Циклограмма М.С. Будникова	<ul style="list-style-type: none"> – возможность наглядно представить развитие строительного потока во времени и пространстве; – описание взаимосвязи и взаимовлияния работ по технологическим и организационным требованиям; – наглядное отображение частных фронтов (захваток) и порядка выполнения на них работ 	<ul style="list-style-type: none"> – не содержит характеристик работ, не отображает в явном виде связи между работами, а также резервы времени работ; – отражает динамику процесса и возможные отклонения только в пределах критических сближений между смежными потоками при строгом соблюдении запланированной последовательности работ; – отображаются только основные работы, выполняемые непосредственно на том или ином частном фронте, а прочие работы (заготовительные, транспортные и др.) не отображаются; – для сложных объектов с неоднородными объемами работ, когда они распределены по отдельным участкам неравномерно и при сложных взаимосвязях работ, наглядность циклограммы существенно снижается
Сетевой график типа «работы на дугах»	<ul style="list-style-type: none"> – наглядность: дает представление о технологических и организационных зависимостях и последовательности работ; – наглядность: виден конечный срок процесса производства работ, выделены работы, определяющие его продолжительность (работы критического пути, или критические работы), что создает условия для прогнозирования хода производственного процесса; – возможность сосредоточить основное внимание и усилия на работах, от выполнения которых зависит срок сдачи объекта в эксплуатацию, и принять необходимые меры для обеспечения своевременного завершения работ 	<ul style="list-style-type: none"> – не содержит детальных характеристик работ и не раскрывает характера связей между ними; – представляет сложность для обычного пользователя, может быть трудночитаемым из-за большого числа линий, связей (зависимостей), событий и пересечений; при начертании его в масштабе времени наглядность существенно снижается; – при начертании его в стандартной форме отсутствует возможность отображения потребности в трудовых и материальных ресурсах на каждый определенный момент времени; – при детализации работ по частным фронтам (захваткам) наглядность графика может существенно снизиться; – разработка может оказаться трудоемкой и затратной по времени задач

Составлено автором по материалам источников [1–9]

В отечественной теории и практике с 1970-х гг. предлагались различные варианты комбинирования данных трех инструментов с целью устранения их недостатков: линейный календарный график в системе ОФР, циклограмма в системе ОВР, сетевой график в ленточной форме в системах ОФР и ОВР,

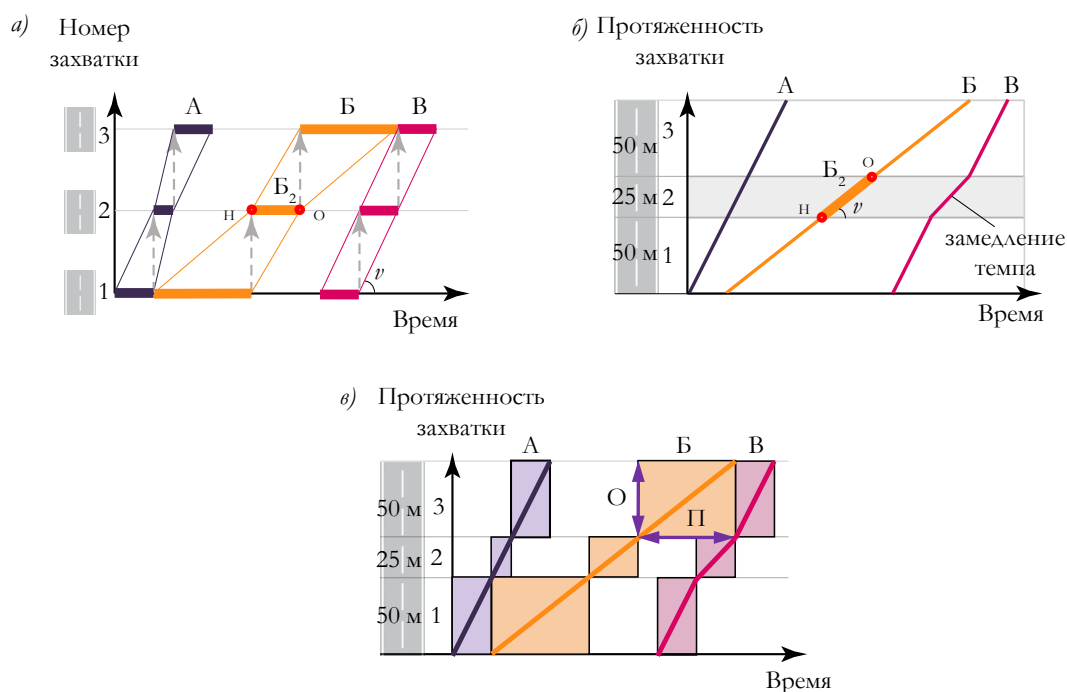
сетевая циклограмма в системах ОФР и ОВР и т.п., календарно-сетевые графики, модификация сетевых моделей [10; 11]. Однако принципиально нового вида графической организационно-технологической модели так и не было изобретено. Комбинированные формы календарных графиков способны устранить часть недостатков, но чаще всего, значительно ухудшают наглядность модели.

При исследовании вопроса выбора инструмента визуализации выполнения работ в поточных проектах целесообразно рассмотреть также некоторые разновидности календарных графиков, распространенные за рубежом.

ЗАРУБЕЖНЫЕ ГРАФИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ПОТОЧНЫХ ПРОЕКТОВ

За рубежом самыми распространенными графическими моделями календарного планирования поточных проектов являются линейные и сетевые календарные графики, несмотря на все их недостатки, которые также отмечаются в многочисленных исследованиях [12]. Основной причиной этого, несмотря на одномерное представление данных, является их наглядность [13]. В проектах высотного строительства распространены таблицы Microsoft Excel с данными потоков в силу их простоты и привычности [14]. Широко используемое специализированное программное обеспечение для календарного планирования и управления проектами (Primavera, Microsoft Project и др.) построено на методе критического пути и не может обрабатывать поточные проекты, не усложняя график взаимосвязями между захватками.

Также широкое распространение получили два инструмента – график line of balance (LOB) и циклограмма (рис. 2). В графике LOB (а) на ось ординат наносятся номера захваток, работа на каждой захватке изображается отдельной горизонтальной линией [15]. Циклограмма (б) потока, используемая в зарубежной практике, показывает освоение пространства – фронта работ (протяженности – в случае линейных объектов), отмечаемого по оси ординат, во времени (ось абсцисс) [16]. В отличие от привычной для отечественного специалиста классической циклограммы М.С. Будникова такой вариант циклограммы имеет масштабированную ось ординат, где захватки отображаются отрезками оси, пропорциональными частному фронту работ или протяженности захватки в общем фронте работ.



Примечание: а – график line of balance; б – циклограмма с масштабированной осью ординат; в – график duration-distance
 Составлено автором по материалам источника [17]

Рис. 2. Графические организационно-технологические модели (на примере неритмичного потока строительства автомобильной дороги), применяемые за рубежом

На рис. 2 изображены три последовательно выполняемые работы (а), (б) и (в) на каждой из которых задействовано по одной бригаде, непрерывно перемещающейся по трем захваткам разного размера (протяженности). Оба графических инструмента имеют свои плюсы и минусы с точки зрения визуализации процесса. Главным преимуществом графика LOB (притом, что он не отображает никакой информации о размере захваток), является четкое представление времени начала (н) и окончания (о) работ в виде горизонтальных линий, как на линейном календарном графике.

Использование графиков LOB позволяет отследить непрерывность работы бригад и избежать нарушения логических связей. Масштабированные циклограммы же в основном используются в проектах линейного строительства (например, автомобильных дорог) с захватками разного размера. При непрерывном использовании трудовых ресурсов время окончания работы (о) на захватке становится временем начала (н) этой же работы на следующей захватке. Масштабированные циклограммы напрямую не показывают продолжительность выполнения работы или ее объем, но они хорошо отображают темп (скорость) выполнения работы (v) на каждой захватке в зависимости от ее размера.

Хотя линии работ (а) и (б) сливаются в прямые, то есть на всех захватках одинаковый наклон линий, их различная длина свидетельствует о различной продолжительности выполнения работ на соответствующих захватках. На циклограмме отчетливо видно, что меньшая продолжительность работ (а) и (б) на II захватке пропорциональна меньшей протяженности этой захватки. У работы (в) все иначе. График LOB показывает, что у работы (в) одинаковая продолжительность выполнения на всех захватках. II захватка меньше по протяженности, и медленный темп выполнения на ней (что хорошо видно на циклограмме) приводит к тому, что продолжительность работы увеличена до такой же, как на других, более крупных захватках (видно на графике LOB).

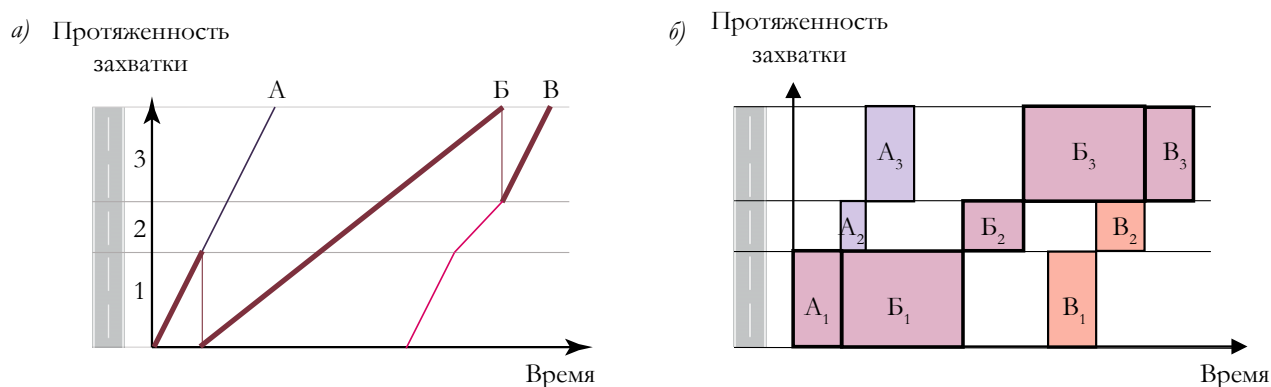
Несмотря на наглядность и удобство в использовании, обе разновидности графиков имеют ряд недостатков, а на практике зачастую бывают перегружены даже для небольших проектов. Зарубежные исследователи и в XX в., и относительно недавно подчеркивали важность повышения наглядности календарных графиков [18; 19]. Предлагалось также тщательно продумывать степень детализации графиков потоков и избегать их перегруженности [20]. Установлено, что инженерно-технические работники воспринимают графики LOB намного лучше, чем сетевые графики со стрелками, но не до такой степени, чтобы использовать их вместо классических линейных календарных графиков [21]. График LOB может быть преобразован в недельные линейные календарные графики, на которых четко обозначены критические работы и резервы.

Чтобы объединить преимущества визуализации графика LOB и масштабированной циклограммы, авторским коллективом из Университета Уотерлу в Канаде под руководством Т. Хегази был предложен новый вид графика под названием *duration-distance chart* [17].

В графике *duration-distance* работы на захватках отображаются в виде прямоугольников с линиями циклограммы на переднем плане. Вертикальные стороны прямоугольника показывают объемные показатели захватки (О), например протяженность, а горизонтальные – продолжительность работы на захватке (П). График *duration-distance* сочетает в себе преимущества *line of balance* и циклограммы. Он хорошо визуализирует каждую работу, что помогает в проверке на наличие помех в зонах продолжительности и расстояния выполнения задач. Этот вид графика подходит для всех типов поточных проектов. В компьютерной версии такого графика можно включать или отключать настройки просмотра для линий потока, фоновых полос или того и другого в соответствии с потребностями пользователя.

Авторы также отмечают, что график *duration-distance* предоставляет удобочитаемое отображение потоков так называемых «разрозненных» (англ. *scattered*) проектов (например, поточные восстановительные работы на нескольких мостах, участках дорог, школах, расположенных в разных местах) [17].

По графику *duration-distance* легко найти безразрывный путь – цепочку работ, определяющих продолжительность проекта, аналогично критическому пути в сетевых моделях. «Путь» – это любая конечная последовательность работ на захватках от первой работы на первой захватке до последней работы на последней захватке. Безразрывный путь исключает организационные перерывы между работами и отображается на циклограмме посредством выделения жирным начертанием или другим цветом участков ломаных или прямых линий работ, а также вертикальных штриховых линий в местах критического сближения (рис. 3). Проекция безразрывного пути на ось абсцисс, то есть шкалу времени, должна быть непрерывной.



Составлено автором по материалам источника [17]

Рис. 3. Отображение безразрывного пути разноритмичного объектного потока:
а) на масштабированной циклограмме; б) на графике duration-distance

По предложенному канадскими исследователями методу безразрывный путь на графике duration-distance определяется еще проще и понятнее. Начиная с последнего прямоугольника работ B_3 , последовательность может идти либо к B_2 , либо к B_3 . Поскольку оба прямоугольника работ имеют одинаковое время завершения, последовательность переходит к предшествующему прямоугольнику B_3 , поскольку через него быстрее добраться до первого прямоугольника работ A_1 . Далее, при переходе от B_3 к B_2 или A_3 , безразрывный путь становится $B_3-B_3-B_2$, поскольку B_2 граничит с B_3 , и процесс продолжается таким же образом, пока не будет достигнут прямоугольник работ A_1 [17]. В безразрывном пути прямоугольники работ граничат друг с другом либо вертикальными сторонами, либо углами.

МОЗАИЧНАЯ ЦИКЛОГРАММА КАК ИНСТРУМЕНТ ВИЗУАЛИЗАЦИИ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ПОТОЧНЫХ ПРОЕКТОВ

В ходе развития идеи авторов графика duration-distance можно предположить, что фоновые для наклонных линий работ прямоугольники в нем имеют все предпосылки, чтобы быть основными, а не вторичными (после линий работ) элементами графика [17]. Линии работ в этом случае являются диагоналями этих прямоугольников, но основное внимание акцентируется на параметрах самих прямоугольников. Целесообразно также рассматривать пустоты с перерывами между ними как отдельные прямоугольники, и тогда вся плоскость графика при раскраске прямоугольников работ и перерывов разными цветами предстает в виде своего рода мозаики. В связи с этим такую разновидность графика можно назвать мозаичной циклограммой.

На рис. 4 приведен пример мозаичной циклограммы для проекта строительства производственного комплекса с пристроенным административно-бытовым корпусом при параллельно-поточной организации работ с непрерывным использованием ресурсов, рассмотренного в работе [22]. В работах (а) и (в) (работы подготовительного периода и возведение надземной части) задействовано по две бригады, каждая из которых отмечена различной штриховкой. Следует отметить, что представленная форма графика, по сути, совмещает в себе преимущества визуализации как циклограммы, так и линейного календарного графика, которые приведены в работе [22].

В развитие основной идеи мозаичной циклограммы также можно предложить разграничивать организационные и технологические перерывы разными цветами или штриховкой. Например, организационные перерывы можно обозначать белым цветом, а технологические – серым.

В поточных проектах с захватками разного размера ценой одного деления на оси ординат целесообразно назначить плановый средний общий темп (скорость) выполнения работ на всем фронте работ в одну единицу времени (день, смену), если она назначена ценой деления на оси абсцисс. Плановый средний общий темп рассчитывается путем деления плановой величины общего фронта работ, измеряемой в определенных единицах измерения (погонные метры протяженности для линейных объектов, квадратные или кубические метры, этажи и т.п. – для зданий и сооружений) на плановую общую

между уровнями (слоями) графика. Для визуализации потоков с параллельными или совмещенными работами целесообразнее применение масштабированной циклограммы с разноцветными линиями работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После рассмотрения различных видов календарных графиков поточных проектов следует отметить, что ни один из них не определяет метода организации работ. Один и тот же вариант организации работ, сформированный по какому-либо методу организации, может быть представлен на календарном графике любого вида.

Выбор того или иного вида календарного графика для отображения модели организации конкретного комплекса работ зависит от ряда обстоятельств как объективного, так и субъективного характера (например, от знаний и привычки разработчика пользоваться той или иной формой графика).

Во многом выбор вида календарного графика для поточного проекта определяется степенью однотипности и однородности работ в нем. При планировании организации комплекса работ с большой степенью однотипности и однородности целесообразно использование разновидностей графиков, хорошо отображающих связи между работами, – сетевых графиков типа «работы на дугах» в линейной (ленточной) форме (как на рис. 1) и сетевых циклограмм. При снижении степени однотипности и однородности работ также уместно построение классической или мозаичной циклограммы и сетевого графика в масштабе времени. При организации комплекса работ с низкой степенью однотипности и однородности возможно использование всех указанных выше графиков, а также простого линейного календарного графика без отображения связей между работами.

С точки зрения визуализации процесса самой информативной формой графика для поточных проектов является циклограмма, особенно при дополнении ее связями между работами (сетевая циклограмма). Однако если на циклограмме отображается слишком много работ, график превращается в запутанный лабиринт наклонных линий, которые часто пересекаются. В некоторых случаях целесообразно строить отдельную циклограмму для каждого возможного пути, прежде всего – для критического. Может помочь использование разноцветных линий, а также дополнительных вертикальных и горизонтальных линий, показывающих движение рабочей силы по захваткам. Опытный планировщик может выбрать оптимальный уровень детализации графика для каждого частного случая.

Основная трудность при составлении как линейного календарного графика, так и циклограммы заключается в отображении параллельных или совмещенных работ, которые имеют одинаковый ритм. Например, если две работы накладываются друг на друга, их трудно различить, если они не обозначены разноцветными линиями. Выбор подходящей шкалы и цены деления на графике часто имеет решающее значение для лучшего восприятия содержащейся в нем информации.

Для поточных проектов с работами без совмещения целесообразно использование мозаичной циклограммы, которая в этом случае способна лучше других видов календарных графиков визуализировать развитие потоков во времени и пространстве. Ее полноценная в этом смысле двумерность соответствует основному назначению календарного графика поточного проекта. Перспективным выглядит использование данного инструмента визуализации в составе специализированного программного обеспечения для календарного планирования поточных проектов, разработка которого способствовала бы повышению качества управления такими проектами в условиях цифровизации отечественной экономики.

Список литературы

1. Гребенников М.В., Долженко Ю.А., Колосова Е.В., Малютин И.А., Сухачев К.А. Сорвать нельзя спланировать: как планировать строительные проекты, чтобы выполнять их в срок: руководство по организации, планированию и контролю строительных проектов. Иваново: ПресСто. – 2023. 312 с.
2. Афанасьев В.А. Поточная организация строительства. Ленинград: Стройиздат. – 1990. – 304 с.
3. Баркалов, С. А. Генезис процессов организационно-технологического моделирования строительного производства / С. А. Баркалов, П. Н. Курочка, В. Я. Мищенко // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2020. – № 9(741). – С. 76-92. – DOI 10.32683/0536-1052-2020-741-9-76-92. – EDN YINOMF.
4. Голубева, Е. А. Совершенствование календарного планирования производства строительно-монтажных работ при возведении объекта / Е. А. Голубева, И. П. Диденко // Техника и технологии строительства. – 2024. – № 4(40). – С. 26-32. – EDN FXCVCD.

5. Применение матричных моделей и комплексного критерия оптимизации в календарном планировании строительного производства / Д. И. Емельянов, Н. А. Понявина, И. А. Клоков, К. А. Андреева // *Строительное производство*. – 2020. – № 4. – С. 51-57. – DOI 10.54950/26585340_2020_4_51. – EDN YMLXFH.
6. Каган, П. Б. Совершенствование разработки технологических карт в строительстве / П. Б. Каган, Т. А. Барбанова // *Строительство: наука и образование*. – 2012. – № 4. – С. 5. – EDN PTUHHL.
7. Король, С. П. Алгоритмический подход в сетевом моделировании в строительстве: графические решения и оптимизационные задачи / С. П. Король, Р. А. Король // *Жилищные стратегии*. – 2023. – Т. 10, № 3. – С. 317-332. – DOI 10.18334/zhs.10.3.118842. – EDN СТТТЕW.
8. Король, С. П. Сетевое моделирование в календарном планировании организационно-технологического проектирования: строительство / С. П. Король, Р. А. Король // *Экономика, предпринимательство и право*. – 2023. – Т. 13, № 9. – С. 3317-3328. – DOI 10.18334/ep.13.9.118701. – EDN QITSYW.
9. Методы формирования и оптимизации календарных планов строительных предприятий / П. П. Олейник, А. Ю. Юргайтис, Г. О. Воронина, А. В. Макаренко // *Технология и организация строительного производства*. – 2017. – № 1(2). – С. 3-7. – EDN YEJRBV.
10. Афанасьев В.А., Величкин В.З. Проектирование организации работ с помощью ЭВМ. Ленинград. ВИКИ им. А.Ф. Можайского. – 1975. – 203 с.
11. Воропаев В.И. Модели и методы календарного планирования в автоматизированных системах управления строительством. Москва: Стройиздат. – 1975. – 232 с.
12. Duffy, G., Woldesenbeth, A., Jeong, H., & Oberlender, G. (2012). Advanced linear scheduling program with varying production rates for pipeline construction projects. *Automation in Construction*, 27, 99–110. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.05.014>
13. Yamín, R., & Harmelink, D. (2001). Comparison of linear scheduling model (LSM) and critical path method (CPM). *Journal of Construction Engineering and Management*, 127(5), 374–381. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2001\)127:5\(374\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2001)127:5(374))
14. Hegazy, T., & Kamarah, E. (2008). Efficient repetitive scheduling for high-rise construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(4), 253–264. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2008\)134:4\(253\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:4(253))
15. Tang, Y., Sun, Q., Liu, R., & Wang, F. (2018). Resource leveling based on line of balance and constraint programming. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 33(10), 864–884. <https://doi.org/10.1111/mice.12383>
16. Eid, M. S., Elbeltagi, E. E., & El-Adaway, I. H. (2018). Simultaneous multi-criteria optimization for scheduling linear infrastructure projects. *International Journal of Construction Management*, 21(1), 41–55. <https://doi.org/10.1080/15623599.2018.1505027>
17. Hegazy, T., Saad, D. A., & Mostafa, K. (2020). Enhanced repetitive-scheduling computation and visualization. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(10), 04020118. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001911](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001911)
18. Vorster, M., Beliveau, Y., & Bafna, T. (1992). *Linear scheduling and visualization*. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1992/1351/1351-006.pdf>
19. Kamarah, E. (2019). *Framework for scheduling, controlling, and delivery planning for scattered repetitive infrastructure rehabilitation projects* [Doctoral dissertation, University of Waterloo]. <https://dspacesmainprd01.lib.uwaterloo.ca/server/api/core/bitstreams/8da882e3-2c2d-42f5-b728-359b539fa10d/content>
20. Arditi, D., Tokdemir, O. B., & Suh, K. (2002). Challenges in line-of-balance scheduling. *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(6), 545–556. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2002\)128:6\(545\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2002)128:6(545))
21. Arditi, D., & Albulak, M. Z. (1986). Line-of-balance scheduling in pavement construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 112(3), 411–424. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1986\)112:3\(411\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1986)112:3(411))
22. Сиверикова, А. И. Параллельно-поточный метод организации строительства / А. И. Сиверикова, В. З. Величкин // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. – 2015. – № 4(31). – С. 135-162. – EDN UISICX.

References

1. Grebennikov, M. V., Dolzhenko, Yu. A., Kolosova, E. V., Malyutin, I. A., & Sukhachev, K. A. (2023). *To disrupt not to plan: how to plan construction projects to get them done on time: A guide to organizing, planning and controlling construction projects*. PresSto. (In Russian).
2. Afanas'yev, V. A. (1990). *Organization of mass construction*. Stroyizdat. (In Russian).
3. Barkalov, S. A., Kurochka, P. N., & Mishchenko, V. Ya. (2020). Stages (history) of modeling of organizational and technological processes of construction production. *News of Higher Educational Institutions. Construction*, (9), 76–92. (In Russian). <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2020-741-9-76-92>

4. Golubeva, E. A., & Didenko, I. P. (2024). Improvement of schedule planning for construction and installation works during construction of an object. *Technique and Technology of Construction*, (4), 26–32. (In Russian).
5. Emel'yanov, D. I., Ponyavina, N. A., Klokov, I. A., & Andreyeva, K. A. (2020). Application of matrix models and a complex optimization criterion in the scheduling of construction production. *Construction Production*, (4), 51–57. (In Russian). https://doi.org/10.54950/26585340_2020_4_51
6. Kagan, P. B., & Barabanova, T. A. (2012). Improving the development of technological cards in construction. *Construction: Science and Education*, (4), 5. (In Russian).
7. Korol', S. P., & Korol', R. A. (2023). Algorithmic approach in network modeling in construction: Graphical solutions and optimization tasks. *Russian Journal of Housing Research*, 10(3), 317–332. (In Russian). <https://doi.org/10.18334/zhs.10.3.118842>
8. Korol', S. P., & Korol', R. A. (2023). Network modeling in the calendar planning of organizational and technological design: Construction. *Journal of Economics, Entrepreneurship and Law*, 13(9), 3317–3328. (In Russian). <https://doi.org/10.18334/epp.13.9.118701>
9. Oleynik, P. P., Yurgaytis, A. Yu., Voronina, G. O., & Makarenko, A. V. (2017). Methods for the formation and optimization of calendar plans for construction companies. *Technology and Organization of Construction Production*, (1), 3–7. (In Russian).
10. Afanas'yev, V. A., & Velichkin, V. Z. (1975). *Designing work organization using a computer*. VIKI im. A.F. Mozhayskogo Publ. House. (In Russian).
11. Voropayev, V. I. (1975). *Models and methods of scheduling in automated construction management systems*. Stroyizdat. (In Russian).
12. Duffy, G., Woldesenbet, A., Jeong, H., & Oberlender, G. (2012). Advanced linear scheduling program with varying production rates for pipeline construction projects. *Automation in Construction*, 27, 99–110. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.05.014>
13. Yamín, R., & Harmelink, D. (2001). Comparison of linear scheduling model (LSM) and critical path method (CPM). *Journal of Construction Engineering and Management*, 127(5), 374–381. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2001\)127:5\(374\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2001)127:5(374))
14. Hegazy, T., & Kamarah, E. (2008). Efficient repetitive scheduling for high-rise construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(4), 253–264. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2008\)134:4\(253\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:4(253))
15. Tang, Y., Sun, Q., Liu, R., & Wang, F. (2018). Resource leveling based on line of balance and constraint programming. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 33(10), 864–884. <https://doi.org/10.1111/mice.12383>
16. Eid, M. S., Elbeltagi, E. E., & El-Adaway, I. H. (2018). Simultaneous multi-criteria optimization for scheduling linear infrastructure projects. *International Journal of Construction Management*, 21(1), 41–55. <https://doi.org/10.1080/15623599.2018.1505027>
17. Hegazy, T., Saad, D. A., & Mostafa, K. (2020). Enhanced repetitive-scheduling computation and visualization. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(10), 04020118. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001911](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001911)
18. Vorster, M., Beliveau, Y., & Bafna, T. (1992). *Linear scheduling and visualization*. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1992/1351/1351-006.pdf>
19. Kamarah, E. (2019). *Framework for scheduling, controlling, and delivery planning for scattered repetitive infrastructure rehabilitation projects* [Doctoral dissertation, University of Waterloo]. <https://dspacemainprd01.lib.uwaterloo.ca/server/api/core/bitstreams/8da882e3-2c2d-42f5-b728-359b539fa10d/content>
20. Arditi, D., Tokdemir, O. B., & Suh, K. (2002). Challenges in line-of-balance scheduling. *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(6), 545–556. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2002\)128:6\(545\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2002)128:6(545))
21. Arditi, D., & Albulak, M. Z. (1986). Line-of-balance scheduling in pavement construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 112(3), 411–424. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1986\)112:3\(411\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1986)112:3(411))
22. Siverikova, A. I., & Velichkin, V. Z. (2015). Parallel and stream methods of construction organization. *Construction of Unique Buildings and Structures*, (4), 135–162.