

УДК 004.9

Краткий исторический анализ развития методов математического моделирования в управлении проектами

© Е.И. Провилков¹, Р.Д. Гутгарц²Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация

Представлен краткий ретроспективный анализ развития методов математического моделирования в области управления проектами. Показаны основные этапы развития этих методов в России и за рубежом. Был проведен анализ исторических источников, а также других научных работ, в которых отражены принципиальные моменты развития математического моделирования в управлении проектами. Построена ретроспектива развития методов математического моделирования в управлении проектами, их проблемы и решения. На основе результатов анализа и промежуточных выводов в качестве следующего шага исследования возможно проведение углубленного анализа современного состояния методов математического моделирования в управлении проектами.

Ключевые слова: математическое моделирование, управление проектами, сетевой график, сетевое планирование, история науки, оценка работ

Brief historical analysis of development of mathematical modeling methods in project management

© Yegor I. Provilkov, Rimma D. Gutgartz

Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation

The article presents a brief retrospective analysis of the development of mathematical modeling methods in the field of project management and shows the main stages of the development of these methods in Russia and abroad. The article analyzes historical sources, as well as other scientific works, which reflected the fundamental points of the development of mathematical modeling in project management. The article provides a retrospection of the development of mathematical modeling methods in project management, their problems and solutions. Based on the results of the analysis and intermediate conclusions, the article concludes that as the next step of the research it is possible to conduct an in-depth analysis of the current state of mathematical modeling methods in project management.

Keywords: math modeling, project management, network graph, network planning, history of science, work estimation

Часть окружающего нас мира, существующая в форме искусственно созданных систем, образовалась посредством реализации соответствующих проектов. Даже современного человека, избалованного цивилизацией и прогрессом, но еще не лишенного любознательности, поражают и восхищают рукотворные памятники, великие достижения и свершения давнего и недавнего прошлого, например, египетские пирамиды, собор святого Петра в Риме, Московский Кремль или современная авиация и покорение космоса. И любого человека интересует вопрос, как удалось этого достичь? Деятели искусства, науки и техники, инженеры, организаторы и предприниматели, т.е. все те, кто ставит перед собой цели и достигает их, могут дать единый ответ: это так ... задумано, спланировано, реализовано и проконтролировано! Вместо многоточия можно добавить: обоснованно, дальновидно, надежно, согласованно, реалистично, профессионально и т.п.

Во главе всех великих свершений прошлого явно или неявно стоял изобретательный инициатор и одаренный руководитель. В контексте современной терминологии такого человека можно назвать проект-менеджером. До недавнего времени управление проектом счи-

¹ Провилков Егор Игоревич, аспирант кафедры автоматизированных систем, e-mail: provilkoff@gmail.com
Yegor I. Provilkov, Postgraduate of the Department of Automated Systems, email: provilkoff@gmail.com

² Гутгарц Римма Давыдовна, доктор экономических наук, профессор кафедры автоматизированных систем, e-mail: gutgarc@gmail.com
Rimma D. Gutgartz, Candidate of economical sciences, Professor of the Department of Automated Systems, email: gutgarc@gmail.com

талось искусством, требующим сочетания природного дара, ума, воли, жизненного опыта и полученных знаний. Подобному набору требований могли удовлетворить только отдельные выдающиеся личности.

И так было на протяжении многих веков, с тех пор, как люди начали воплощать в жизнь свои первые замыслы-проекты, потребовавшие управления. Однако бурное развитие цивилизации и ускорение научно-технического прогресса, особенно ярко проявившиеся во всех сферах созидательной деятельности во второй половине XX века, «востребовало на авансцену» новую массовую профессию – проектного менеджера.

Именно в силу исторической и общественной необходимости за последние 40 лет сформировалось научно-прикладное направление «Управление проектами» или «Проект-менеджмент» (англ. Project Management). Оно является самостоятельной предметной областью теоретических исследований и реализации практических решений, позволяющих обособивать и осуществлять проекты разных типов и масштабов при помощи специально разработанных и подтвержденных опытом методов и средств, адекватного мышления и рациональных способов осуществления проектной деятельности.

Начало формирования современной концепции управления проектами (УП) приходится на середину 1950-х гг. в США и уже в 1960-х гг. получила развитие на Западе. К этому же времени относится проникновение идеологии УП в Россию. Однако процессы развития УП на Западе и в бывшем СССР были различными и изолированными друг от друга [1, с. 91].

Поскольку реализация любого проекта непосредственно связана с использованием ресурсов (финансовых, трудовых, материальных), а критически важными являются два показателя – время и деньги, то основной миссией проектного менеджера является «борьба с неопределенностью», которая может возникнуть и фактически возникает в процессе выполнения реальных проектов в аспекте их ресурсного обеспечения. Соответственно, чем более упорядочен и прозрачен этот процесс, чем больше имеется рычагов контроля и воздействия на все составляющие проекта, тем более определенной и успешной будет работа в рамках плана проекта. Для этих целей на протяжении последних 160 лет и были разработаны специальные методы. Уже доказано, что эти методы основаны на применении математических моделей.

Данная статья является «отправной точкой» для проведения исследования по тематике использования математического моделирования в управлении проектами. Чтобы иметь возможность развивать научную и прикладную область относительно математического моделирования в УП, для начала необходимо проанализировать текущее состояние в этой области с точки зрения появления и решения проблем, а также выявить проблемы, которые до настоящего времени по разным причинам остаются либо нерешенными вообще, либо решенными частично. Однако невозможно достаточно ясно определить текущее состояние в применении методов математического моделирования в УП без погружения в историю темы, без исследования динамики этого процесса. Поэтому *целью настоящего исследования* являлось построение хронологической цепочки развития методов математического моделирования в области УП.

Истоки формализованного подхода к проектному управлению лежат на рубеже XIX–XX вв. Одним из известных методов, позволяющих достаточно эффективно управлять проектами, является временной график Ганнта – идея для своего времени революционная, которая на протяжении века на практике доказала свою результативность, хотя имеет ограничения в применении (наиболее пригодна для относительно несложных по функциональности проектов). Генри Лоуренс Ганнт (1861–1919 гг.) был одним из известных учеников Фредерика Уинслоу Тейлора (1856–1915 гг.). Американский инженер Ганнт интересовался уже не отдельными операциями и движениями, как его учитель, а производственными процессами в целом. Согласно Ганнту, «...основные различия между наилучшей сегодняшней и прежними системами состоят в способах планирования и распределения задач, а также способах распределения поощрений за их выполнение» [2, с. 15]. Следуя этому принципу, Ганнт поставил цель усовершенствовать механизмы функционирования предприятий путем обновления систем формирования задач и распределения поощрений и премий. Ганнт является первооткрывателем в области оперативного управления и календарного планирования деятельности предприятий, он разработал целую систему плановых графиков (графики Ганнта), позволивших благодаря их высокой информативности осуществлять своевременный и эф-

фективный контроль над процессом. Диаграмма Ганта в качестве модели оказалась настолько практичной, что используется в проектном управлении до сих пор.

В числе первых методов УП в конце 1950-х гг. были разработаны методы сетевого планирования и управления: метод СРМ (Critical Path Method, 1957 г.), который применили при строительстве и ремонте химических заводов Дю Пона. Это был метод критического пути при фиксированном числе работ для составления расписания [3, с. 12]. Почти сразу после распространения метода критического пути в нем был обнаружен существенный недостаток: используемое в СРМ предположение, что «продолжительности всех работ есть определенные величины», не является истинным для большинства проектов. Это обусловлено тем, что лишь отдельные проекты выполняются в изолированной среде, и только изоляция способна снизить уровень энтропии на проекте до значения, близкого к полной детерминированности. В связи с этим появилась новая модель под названием PERT – от англ. Project Evaluation and Review Technique (техника оценки и анализа проекта).

PERT использует три временные оценки для каждой работы, в результате чего каждая работа оценивается математическим ожиданием продолжительности ее выполнения и дисперсией. Разновидностью данного метода стал метод PERT-Cost, который использует в параметрах сети стоимостные оценки работ. Следует отметить, что СРМ и PERT прекрасно дополнили друг друга и используются при планировании проектов и в настоящее время. В отличие от графиков Ганта методы PERT и СРМ применялись для сложных проектов из тысяч работ [3, с. 13].

В СССР развитие современных методов УП началось с появления в 1959 г. в США первых публикаций о сетевых методах (метод критического пути, метод PERT [4, 5]). Первые работы по сетевым методам в СССР были опубликованы в начале 1960-х гг. такими учеными, как Г.С. Поспелов, А.И. и Тейман [6], Ю.А. Авдеев [7]. Появившаяся тогда же монография С.И. Зуховицкого и К.А. Радчика [8] до сегодняшнего дня остается одной из лучших по рассматриваемой тематике. Истоки управления проектами в СССР показаны на рис. 1.

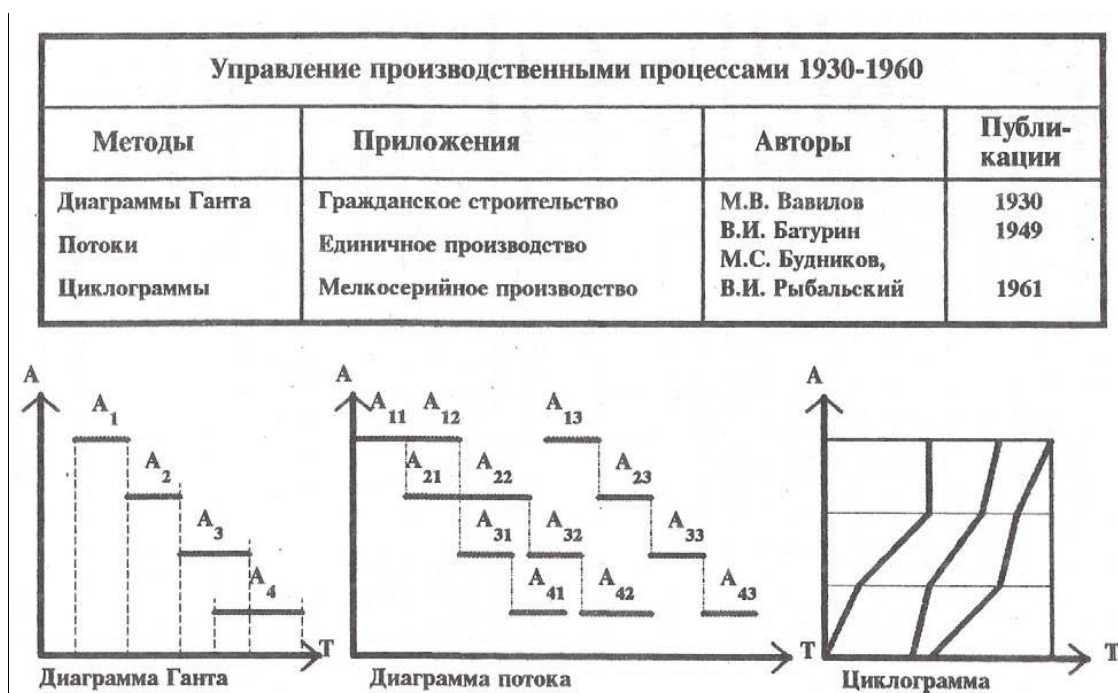


Рис. 1. Истоки управления проектами в СССР [3, с. 13]

С начала 1970-х гг. сетевые модели начали широко внедряться для управления и планирования процессами создания и освоения новых изделий на машиностроительных предприятиях СССР, в частности, в авиационной промышленности. Два упомянутых выше метода (PERT + СРМ) стали известны как методы сетевого планирования. Основным плановым документом в системе сетевого планирования и управления (СПУ) является сетевой график (сетевая модель или просто сеть), представляющий собой информационно-динамическую модель, в которой изображаются взаимосвязи и результаты всех работ, необходимых для достижения конечной цели проекта. В сетевом графике детально или укруп-

нено показывается, что, в какой последовательности, когда (за какое время), для чего необходимо выполнить, чтобы обеспечить окончание всех работ не позднее заданного (директивного) срока. Сетевая модель отражает логическую последовательность и взаимосвязи работ, которые должны быть осуществлены для того, чтобы достичь определенной цели. Сетевая модель (график) (СМ) представляет собой конечный ориентированный граф, в котором одна вершина не имеет входных дуг (начальных вершин) и одна вершина не имеет исходных дуг (конечных вершин).

Теория графов оперирует понятием «путь», под которым понимается такая последовательность ребер, когда конец каждого предыдущего ребра совпадает с началом последующего. Понятие «контур» означает конечный путь, у которого начальная вершина совпадает с конечной. Исторически сложившееся представление графа состоит из двух основных элементов – ребер и вершин. Таким образом, сетевой график – это ориентированный граф без контуров, ребра которого имеют одну или несколько числовых характеристик. Ребрами изображаются на графе работы, а вершинами графа – события. Современное представление графа отличается от ранее разработанного: элементная база графа сужается до одного понятия – процесс, который имеет начало, завершение и длительность [3, с. 14].

В 1970-х гг. продолжается развитие и внедрение систем сетевого планирования и управления. Техника сетевого анализа и его компьютерные приложения впервые вводятся в учебных заведениях США в качестве обязательных инженерных предметов. Метод СРМ получает законодательную поддержку, и ряд судов США рассматривает претензии участников проектов только при представлении соответствующих расчетов на ЭВМ [1, с. 12].

Были созданы оригинальные сетевые модели, более общие и мощные, чем модели СРМ-типа (critical path method – метод критического пути), МРМ-типа (metra-potential method – метод метра-потенциала) или GERT (graphical evaluation and review technique – метод графической оценки и анализа) [9, 10]. Эти модели, называемые «обобщенными сетевыми моделями» (ОСМ), особенно полезны для описания сложных проектов с различными взаимосвязями между работами и временными ограничениями разного типа [11–13]. Тогда же был разработан спектр стохастических моделей, учитывающих вероятностную природу различных элементов проекта (например, длительности работ, связей, ресурсов) [14, 15].

К началу 1970-х гг. методы управления проектами, основанные на сетевых методах, получили в нашей стране широкое распространение. Было опубликовано более 2500 статей, защищено большое количество диссертаций. Сетевые методы преподавались студентам во всех строительных вузах и на специализированных факультетах. Они вошли в программы различных институтов и курсов повышения квалификации. Эти элементы УП не потеряли своей актуальности и изучаются в вузах до сих пор.

Во многих научно-исследовательских и производственных организациях создавались специальные подразделения и группы СПУ, занимающиеся разработкой и внедрением этих методов. Был создан и специальный институт НИИ СПУ. Методы СПУ, впервые апробированные на одном объекте в 1963 г., уже в 1967 г. были внедрены на 900 стройках. К 1975 г. количество строек, применявших методы СПУ, составило 17–18% от их общего числа [1, с. 106]. Сетевые методы для решения соответствующих задач используются до настоящего времени, хотя с начала 1980-х гг. – уже на качественно новом уровне либо в составе автоматизированных систем управления, либо в локальном варианте в форме специализированного программного продукта. Развитие сетевых методов в СССР показано на рис. 2.

Поскольку в качестве классических элементов сетевого графика принято рассматривать работу и событие, то действительными работами называются любые процессы и/или действия, требующие затрат времени и ресурсов, которые приводят к достижению определенных результатов (событий). Например, действия: «разработка маршрутной технологии», «изготовление штампов», «разработка чертежей» и т.д. Процессы: «механическая обработка деталей», «старение отливок» и т.п. Работой следует считать и возможное ожидание («пролеживание») деталей перед началом обработки, «пролеживание» изготовленных некомплектных элементов конструкции при сборке, ожидание поставок по кооперации и т.д. Здесь требуются только затраты времени. Кроме работ действительных, т.е. требующих затрат времени и ресурсов, существуют так называемые фиктивные работы (зависимости), под которыми понимается связь между какими-либо результатами работ (событиями), не требующими затрат времени и ресурсов. Допустим, сведения о внесенных в чертежи изменениях конструкторы должны сообщить технологом, разрабатывающим маршрутную техно-

логию изготовления автомобиля. К разработке детальных технологических процессов можно приступить только после того, как в маршрутной технологии будут отражены изменения, сделанные конструкторами. Сама передача сведений технологам внутри одной организации практически не займет никакого времени, ее можно считать фиктивной работой. Событиями называются результаты произведенных работ. Событие конкретизирует процесс планирования, исключает возможность различного толкования итогов выполненных работ.

СЕТЕВЫЕ МЕТОДЫ			
Методы	Приложения	Авторы в СССР	Публикации
Критического пути PERT Многопроектные сети	Управление проектами: - промышленными - строительными - исследовательскими ● Временной анализ ● Стоимостной анализ ● Анализ ресурсов ● Распределение ресурсов	Г.С. Поспелов А.И. Тейман Ю.А. Авдеев В.Н. Бурков С.И. Зуховицкий И.А. Радчик	1963 1963 1965 1965
Стохастические сети Альтернативные сети	Анализ рисков/надежности проектов Анализ альтернатив для исследовательских проектов	Д.И. Голенко С.Е. Лившиц К.А. Антоновичус	1968 1971 1971
Обобщенные сети	Временной, стоимостной и ресурсный анализ; распределение ресурсов в сложных проектах	Г.М. Адельсон-Вельский В.И. Воропаев С.С. Калиновская М.В. Шейнберг	1971 - 1974

Рис. 2. Развитие сетевых методов в СССР [1, с. 108]

Результаты перечисленных выше работ, т.е. события, можно записать следующим образом: «маршрутная технология разработана», «штампы изготовлены», «чертежи подготовлены», «механическая обработка деталей закончена», «старение отливок завершено» и т.д. Как видим, формулировка события всегда записывается в совершенной форме, не допускающей различного толкования (т.е. что-то сделано, выполнено, закончено). Каждое событие может быть отправным моментом для начала последующих работ. В отличие от работы, имеющей, как правило, «протяженность» во времени, событие представляет собой только момент свершения работы (или работ). Событие, за которым непосредственно начинается данная работа (работы), называется начальным для данной работы, оно обозначается символом i . Например, для работы «разработка маршрутной технологии» при подготовке производства нового кузова легкового автомобиля начальным может быть событие «разработка конструкции нового кузова закончена». Событие, которому непосредственно предшествует данная работа (работы), называется конечным для данной работы, оно обозначается символом j . Для той же работы конечным может быть событие «разработка маршрутной технологии изготовления кузова закончена». Событие, располагающееся в сети непосредственно перед данным событием так, что между ними нет никаких промежуточных событий, называется предшествующим. Например, для события «разработка маршрутной технологии закончена» предшествующим может быть событие «разработка конструкции нового кузова закончена».

Событие, располагающееся в сети непосредственно после данного события так, что между ними нет никаких промежуточных событий, называется последующим. Для события «разработка маршрутной технологии закончена» последующим может быть событие «разработка технологических процессов закончена». Первоначальное событие в сети, не имеющее предшествующих ему событий и отражающее начало выполнения всего комплекса работ, включенных в данную сеть, называется исходным, оно обозначается символом 1 . Для того же комплекса работ «подготовка производства нового кузова легкового автомобиля» исходным событием может явиться подписание приказа о создании отдела главного конструктора и других отделов (на вновь создаваемом заводе) или о назначении руководителя,

которому поручается комплекс работ по подготовке производства кузова (на действующем заводе).

Событие, которое не имеет последующих событий и отражает конечную цель комплекса работ, включенных в данную сеть, называется завершающим. Оно обозначается символом С. Завершающее событие, которое будет характеризовать окончание подготовки производства кузова автомобиля, может быть сформулировано так «инструментальная оснастка, штампы, нестандартное оборудование для изготовления кузова смонтированы и отлажены». Любая последовательность работ в сетевом графике, в которой конечное событие одной работы совпадает с начальным событием следующей за ней работы, называется путем. Всякая работа сетевого графика кодируется номерами ее начального i и конечного j событий. Например, работа А имеет код (1,2), а работа Д – код (4-7) (рис. 3).

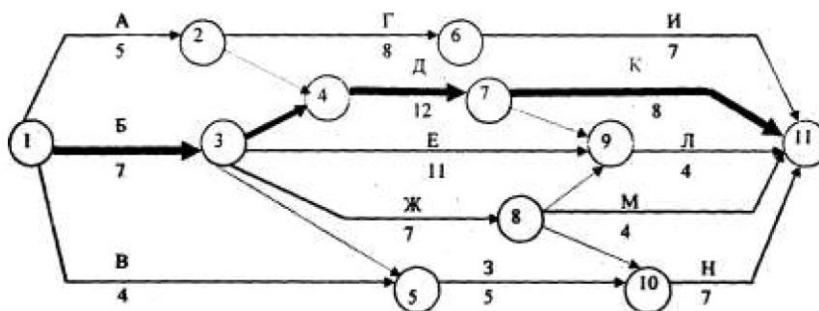


Рис. 3. Пример построения сетевого графика [3, с. 15]

Рассмотрим современный сетевой график. Элементная база сетевых моделей конца XX – начала XXI в. претерпела изменение: в ней отсутствует элемент «событие», используемый ранее. В построении участвует элемент «работа», которая имеет порядковый номер, длительность, раннее и позднее время выполнения, а также резерв времени. Здесь используется методология структурного анализа и проектирования SADT (structured analysis and design technique), интегрирующая процесс моделирования, управление конфигурацией проекта, использование дополнительных языковых средств и руководство проектом со своим графическим языком.

Работа – это процесс. В основу графического представления современных моделей заложен процессный подход. Кибернетическая модель «процесса» напоминает графический образ «черного ящика» с входящими и выходящими потоками, наиболее ярко представленными в SADT-модели, и выполнена с использованием инструментальных средств программного продукта BPwin. Поэтому в графическом представлении современных сетевых графиков используется значок «прямоугольник», а не «круг», как ранее. Параметры элемента «работа–процесс» показаны на рис. 4.



Рис. 4. Параметры элемента «работа–процесс» [3, с. 33]

Математические методы находят свое применение в сфере УП в качестве вероятностно-статистического аппарата: в основе этого применения – понятия вероятности, дисперсии, математического ожидания и законов распределения. В частности, вероятностный подход применяется для определения временной оценки работ.

Оптимистическая оценка, t_{min} – минимально возможный период времени a , в течение которого может быть выполнена данная работа при наиболее благоприятных условиях работы. Наиболее вероятная – наилучшая оценка периода времени m , в течение которого может быть выполнена данная работа. Пессимистическая оценка t_{max} – максимально возможная продолжительность времени выполнения работы b при неблагоприятных условиях работы.

Обозначим: $a = t_{min}$, $b = t_{max}$, $m = t_{nom}$. Необходимо определить ожидаемый срок выполнения работы. Существуют два варианта определения ожидаемого срока выполнения – американский и отечественный [3, с. 31]:

– американский вариант:

$$t_{ож.ср)} = \frac{t_{min} + 4t_{nom} + t_{max}}{6} = \frac{a + 4m + b}{6} ;$$

– отечественный вариант:

$$t_{ож.ср)} = \frac{3t_{min} + 2t_{max}}{5} = \frac{3a + 2b}{5} .$$

Американский вариант представляет собой один из элементов методики PERT – оценка ожидаемого времени, где результат рассчитывается как среднее от одной пессимистической оценки, одной оптимистической и четырех реалистичных. В наши дни его можно встретить в большинстве пособий по управлению проектами, в том числе и изданных в России.

Отечественный вариант формулы ожидаемого срока выполнения не включает в себя реалистичную оценку, а только минимальную и максимальную. С одной стороны, это делает формулу более простой в применении и универсальной. С другой стороны, в случае, если у организации есть накопленная статистика «реалистичных» оценок, отечественный вариант не позволил бы их учесть.

Дисперсия работы также рассчитывается двумя вариантами [3, с. 31–32]:

– американский вариант:

$$\sigma^2 = \left(\frac{t_{max} - t_{min}}{6} \right)^2 = \left(\frac{b - a}{6} \right)^2 ;$$

– отечественный вариант:

$$\sigma^2 = 0,04 \cdot (t_{max} - t_{min})^2 = 0,04 \cdot (b - a)^2 .$$

В американском варианте формулы расчета дисперсии работы будто бы меньшее значение придается разнице между максимальным и минимальным временем, здесь результат возводится в квадрат в последнюю очередь. В отечественном же варианте, напротив, эта разница имеет большое значение, а возведение в квадрат производится прежде, чем вносится усредняющий коэффициент.

У обоих подходов есть свои преимущества и недостатки. Например, достоинством отечественного варианта можно назвать большое внимание к субъективности значения минимального и максимального времени. О достоинствах американского варианта было сказано выше. Для получения более точного результата может потребоваться совместное применение обоих вариантов.

Если дисперсия велика, то существует значительная неопределенность относительно момента завершения работы. Если дисперсность мала, то оценка продолжительности работы достаточно точна в отношении срока ее завершения, т.е. оптимистическая и пессимистическая оценки лежат близко друг к другу (рис. 5 [3, с. 32]).

σ^2 есть мера неопределенности, связанная с продолжительностью выполнения данной работы. Аргумент нормальной функции распределения вероятностей Z находится по формуле [3, с. 32]:

$$Z = \frac{T_d - T_k}{\sqrt{\sigma_{ij}^2}}$$

где T_d – директивный срок окончания всех работ, лежащих на критическом пути; T_k – календарный срок окончания комплексных работ согласно расчету.

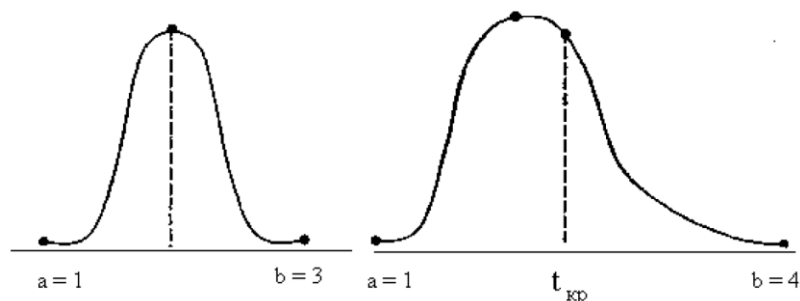


Рис. 5. Дисперсия работ

По значению аргумента нормальной функции распределения Z определяется значение вероятности P свершения события в срок. Также можно отметить, что при Z , близкой к 0, вероятность свершения события близка к 50%, при $Z=1$ $P=84\%$, при $Z=2 \dots P=99\%$. Т.е., чем больше Z , тем выше вероятность свершения события [3].

Таким образом, несмотря на изолированное развитие отечественной и западной математических моделей работ в рамках проекта они имеют много общего, что позволяет использовать их в составе единой макромоделли.

На основании выше изложенного можно сделать следующие выводы:

- 1) в данной работе приведен краткий ретроспективный анализ развития методов математического моделирования в области УП в России и за рубежом;
- 2) история математического моделирования в управлении проектами началась в конце XIX в. (диаграмма Гантта), однако наиболее активное развитие эта часть науки получила в середине XX в. За последующие два десятилетия были открыты такие способы, как метод критического пути и PERT. Вплоть до 1970-х гг. эти модели расширяли свой вариационный ряд, но развитие «вглубь» было заторможено их стремительным распространением «вширь». Отдельно рассмотрены подходы к УП в СССР и становление отечественных методов математического моделирования в этой области;
- 3) показано, что в настоящее время изменилось семантическое содержание основных элементов сетевого графика, а также инструментальная база для их графического отображения;
- 4) дальнейшее исследование будет заключаться в анализе текущего состояния в применении методов математического моделирования для УП. Это связано с тем, что на современном этапе развития науки и практики большинство проектов характеризуется их технологической сложностью и специфическими особенностями по самым разным аспектам (например, участие фрилансеров, использование инновационных технологий и материалов, распределенный характер проекта во времени и пространстве, неограниченные возможности УП в режиме реального времени и др.). Таким образом, организационно-технические и функциональные аспекты проекта могут оказывать существенное влияние на эффективность его осуществления и завершения. А это в свою очередь должно учитываться в математическом обеспечении вычислительных процедур, сопровождающих все типы расчетов при планировании и выполнении любых реальных проектов.

Библиографический список

1. Воропаев В.И. Управление проектами в России, М.: Аланс, 1995. 225 с.
2. Лафта Дж. К., Л29 Менеджмент: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ТК Велби. 2004. 592 с.
3. Абамова И.Г. Управление проектом на основе сетевых моделей: метод. указания / сост. И.Г. Абрамова. Самара: Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета им. Акад. С.П. Королева, 2007. 58 с.

4. Kelly J.E., Walker M.R. Critical Path Planning Scheduling. Critical Path Planning Scheduling. Proceedings of the Eastern Joint Computer Conference. Boston. Dec. 1–3, 1959. P. 160–173.
5. Malcomb D.G., Roseboom J.H., Clark C.E., Fazar W. Applications of a Technique for Research and Development Program Evaluation // Operations Research. 1959. Vol. 7. No 5. P. 646–699.
6. Поспелов Г.С., Тейман А.И. Автоматизация процессов управления разработками больших систем и сложных комплексов // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1963. № 4. С. 60–79.
7. Авдеев Ю.А. Метод критического пути в управлении производством // Строительная газета. 1963. 15 сентября.
8. Зуховицкий С.И., Радчик И.А. Математические методы сетевого планирования. М.: Наука. 1965. 296 с.
9. Pritsker A.A.B., Happ W.W. GERT: Graphical Evaluation and Review Techniques. Part I. Fundamentals // Journal of Industrial Engineering. 1966. Vol. 17 (5). P. 267–274.
10. Pritsker A.A.B., Whitehouse G.E. GERT: Graphical Evaluation and Review Technique. Part II. Probabilistic and Industrial Engineering Applications // Journal of Industrial Engineering. 1966. Vol. 17 (6). P. 229–239.
11. Адельсон-Вельский Г.М., Воропаев В.И., Калиновская С.С. Обобщенные сетевые модели строительного производства // На стройках России. 1971. № 4, 5. С. 28–32; 23–26.
12. Воропаев В.И., Шейнберг М.В. [и др.]. Обобщенные сетевые модели: метод. рекомендации. М.: Из-д-во ЦНИПИАСС. 1974. 118 с.
13. Воропаев В.И. Модели и методы календарного планирования в автоматизированных системах управления строительством. М.: Стройиздат, 1975. 230 с.
14. Голенко Д.И. Статистические методы сетевого планирования и управления. М.: Наука, 1968. 400 с.
15. Антоновичус К.А. Моделирование и оптимизация в управлении строительством М.: Стройиздат. 1979. 198 с.