

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**В.А. Афанасьев , Т.Ф. Морозова**

**МОДЕЛИ ПОТОЧНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ  
РАБОТ**

**Санкт- Петербург**

**2002 г.**

## Введение

Поточная организация работ в строительстве, включающая теорию и методологию формирования, расчета и оптимизации (по принятому критерию) методов организации работ и, прежде всего объектных и комплексных потоков строительства, ремонта и реконструкции объектов, является одним из основных разделов учебной дисциплины, которая в учебных планах различных специальностей носит название "Организация строительства" (ОС); "Организация и планирование строительного производства" (ОПСП), "Организация, планирование и управление строительством" (ОПУС) и др.

Цель изучения этой дисциплины заключается в приобретении обучаемыми знаний состояния и перспектив развития теории и практики организации работ, а также приобретении навыков эффективного решения этих вопросов в конкретных условиях производства.

Данная дисциплина (в дальнейшем для краткости будем именовать ее "Организацией строительства"), занимает промежуточное место **между** дисциплиной "Технология строительного производства", которая изучает организацию отдельных видов работ, и дисциплиной "Экономика строительства", которая изучает вопросы организации строительства в масштабе отрасли.

В дисциплине ОС под организацией понимается решение вопросов, связанных с созданием или выбором из существующих коллектива, способного решить поставленную задачу по строительству, ремонту или реконструкции (далее для краткости под строительством будут пониматься также ремонт и реконструкция) объектов в требуемые сроки, должного качества и в пределах договорной стоимости, в частности вопросов подготовки строительного производства и обеспечения его необходимыми ресурсами, а также вопросов оперативного планирования и управления строительным производством.

Под планированием строительства в дисциплине ОС понимается увязка работ во времени и пространстве, то есть производственное (календарное, динамическое) планирование. Этот вид планирования существенно отличается от экономического

(балансового, статического), изучаемого в дисциплине "Экономика строительства" и направленного на обеспечение потребности в ресурсах поставками на определенный период времени (месяц, квартал, год). Данные виды планирования дополняют друг друга и являются основой управления.

Под управлением строительством в дисциплине ОС понимается поддержание системы (режима функционирования системы) в заданном плане состоянии или перевод ее (в связи с изменением условий функционирования) в новое состояние, определяемое новым (скорректированным) планом.

Коллективный труд всегда нуждался, нуждается, и будет нуждаться в организации, планировании и управлении, в частности в увязке работ во времени и пространстве, установлении технической последовательности и организационной очередности работ, рациональных совмещенности и продолжительности работ, видов работ, фронтальных комплексов работ, объектных и комплексных потоков, рациональной системе поставки и использования (расхода) ресурсов.

Собственно теория организации работ и определяет возможности формирования разнообразных методов организации работ, их оптимизации по тому или иному критерию; оценки, сравнения и выбора наиболее эффективного (применительно к каждому конкретному случаю) варианта.

Увязку элементов в составе системы (методов организации работ) целесообразно осуществлять путем составления и анализа уравнения, связывающего продолжительность рассматриваемого комплекса работ ( $T$ ) с определяющими ее элементами системы ( $t$ ) при учете накладываемых на них ограничений,

$$T = \sum_{q=1}^n t_q,$$

где  $n$  — число элементов системы, определяющих ее продолжительность.

При этом в качестве структурообразующих элементов системы, определяющих ее продолжительность, могут выступать продолжительность отдельных работ, в частности критических; продолжительность видов работ и фронтальных комплексов; продолжительность развертывания и (или) свертывания видов работ, фронтальных комплексов работ, а также объектных потоков в составе комплексного.

В связи с тем, что в данном уравнении потока, как правило, содержатся свободно задаваемые параметры, рассчитывать на то, что первое случайное их назначение приведет к положительному результату, не приходится. Поэтому, как правило, имеет место процесс приведения всех параметров системы к требуемой гармонии, который носит итеративный характер.

Таким образом, в процессе формирования, расчета и оптимизации конкурентоспособных методов организации работ, их оценки и сравнения учитываются и увязываются разнообразные элементы строительного производства при соблюдении основных принципов организации планирования и управления строительством, рассмотрение которых необходимо, так как данная часть дисциплины изучается первой, т. е. предшествует всей дисциплине.

#### **Основные принципы организации планирования и управления строительством:**

1) специализация, кооперирование и комбинирование производства и осуществляющих его организаций, то есть выполнение видов работ специализированными подразделениями, обладающими соответствующей техникой; объединение различных видов работ и осуществляющих их организаций на договорных (кооперативных, паритетных) началах или (при необходимости) слияние отдельных организаций в комбинаты, осуществляющие производственно-хозяйственную деятельность на едином балансе;

2) централизация организации, планирования и управления производственной деятельностью коллектива (организации, предприятия, системы) в пределах, ограниченных владением собственностью, с предоставлением возможно большей самостоятельности его подразделениям;

3) сочетание административно-командных, экономических и социально-психологических методов управления с определенным усилением того или иного метода в зависимости от конкретных условий строительства;

4) использование всех возможностей для повышения производительности труда и экономии ресурсов при обеспечении требуемого качества продукции, договорной стоимости и установленного срока ввода объектов в эксплуатацию;

5) комплексная механизация и автоматизация строительных процессов;

б) широкая индустриализация строительства, предполагающая превращение строительной площадки в монтажную, наряду с развитием монолитного домостроения и их совмещение, если оно экономически эффективно;

7) осуществление строительно-монтажных работ поточным методом;

8) более полный переход от сезонного строительства к круглогодичному за счет расширения перечня круглогодично выполняемых (не связанных с большим удорожанием) работ;

9) рациональная организация материально-технического снабжения с обеспечением своевременности и комплектности поставок;

10) развитие технического прогресса, постоянное обновление средств производства и совершенствование производственных отношений;

11) строгое соблюдение законов и подзаконных актов, за нарушение которых следует административная, материальная или уголовная ответственность;

12) строгое соблюдение охраны труда и техники безопасности, а также требований экологии.

Вопросы поточной организации строительства в данном учебном пособии рассматриваются с позиции Петербургской школы поточной организации работ, которая является обобщением достижений предшествующего развития теории организации работ и ее совершенствованием в направлении систематизации известных и разработки новых видов связей между работами и их комплексами; систематизации известных и разработки новых форм фиксации методов организации работ; использования известных и разработки новых алгоритмов расчета и оптимизации методов организации работ, систематизации известных и разработки новых критериев оптимизации методов организации работ и оценки их вариантов; обеспечения высокой степени детализации календарных планов, формируемых как при подготовке, так и в ходе строительства объектов; обеспечения возможности обобщения опыта организации работ на основе составления исполнительных календарных графиков.

В основе Петербургской школы поточной организации работ лежат многочисленные исследования по бюджетной и заказной тематике; успешно защищенные докторские (17) и кандидатские (30) диссертации; апробация результатов ис-

следований на международных и отечественных форумах и публикация результатов в ряде монографий, учебников и учебных пособий, а также многочисленных статей на русском и иностранном языках. Созданию школы способствовали докторская и кандидатская диссертации авторов учебного пособия, а также результаты других исследований этих авторов.

Работа по написанию учебного пособия была распределена следующим образом: Введение, I часть "Объектные потоки" — В.А. Афанасьевым, II часть "Модели параллельно-поточной организации работ" — Т.Ф. Морозовой.

## **Часть I. ОБЪЕКТНЫЕ ПОТОКИ**

### **Глава 1. МОДЕЛИ, ИХ ФОРМА И СОДЕРЖАНИЕ**

В основе организации строительства лежат модели и моделирование.

**Модель** (латинское *modus*) — копия, образ, очертание объекта наблюдения — является представлением объекта наблюдения с сохранением его существенных для последующего анализа свойств.

**Моделирование** — процесс создания и анализа моделей.

Процесс мышления есть не что иное, как процесс моделирования, то есть процесс создания и анализа моделей. Это же относится к содержательной части и методологии всех наук, в частности науки "Организация строительства" (ОС). Классификация видов моделей ОС представлена на рис. 1.

Моделирование, то есть разработка моделей, осуществляется с учетом следующих принципов:

- 1) целенаправленности, т. е. соответствия модели объекту внимания по основным для него признакам (создавать модель со всеми возможными для объекта свойствами невозможно и не нужно);
- 2) простоты модели, которая, в частности, избавляет от грубых ошибок при ее построении и анализе;
- 3) экономичности;

4) адаптивности модели к изменяющимся при ее использовании условиям.

Модели имеют форму и содержание. В области организации строительства существуют следующие категории моделей:

отражающие структуру строительной организации;

фиксирующие календарные планы, которые, как правило, представляются в виде календарных графиков, матриц и т. д.;

фиксирующие потребности, наличие и поставки ресурсов.

**Календарный план** — зафиксированная система увязки работ во времени и пространстве, представляемая, как правило, в виде **календарного графика** или **матрицы** со сроками производства работ.

Календарные графики стали использоваться с конца прошлого века в виде линейного графика, предложенного Г.Л. Гангом. В середине 30-х годов А.И. Неровецкий и М.С. Будников предложили новую форму календарного графика — циклограмму, а в конце 50-х годов Дж.Е. Келли и М.Р. Уолкер ввели в практику организации работ ориентированные графы — сетевые графики. В начале 70-х годов автор раздела учебного пособия предложил комбинированную форму календарного графика, включающую элементы линейного графика, циклограммы и сетевого графика. В начале 80-х годов В.С. Русакова и В.Г. Драпеко разработали оригинальные разновидности трехмерных календарных графиков.

Линейные календарные графики (ЛКГ) отображают, как правило, виды работ, их характеристики, составы исполнителей и используемой техники, время, продолжительность и сроки выполнения видов работ. Они позволяют разбить виды работ на отдельные работы, выполняемые на частных фронтах, и показать связи между работами. За сеткой ЛКГ выписываются потребности в ресурсах на каждую единицу времени.

Циклограммы, как правило, отображают на оси ординат фронты работ, а на оси абсцисс — время. Сами работы, выполненные на частных фронтах, представляются наклонными линиями. За сеткой циклограммы выписываются потребности в ресурсах на каждую единицу времени. Между работами могут быть показаны связи.

Сетевые графики, т. е. ориентированные графы, могут быть представлены вне масштаба времени и пространства, но с обязательным показом связей между работами, или в масштабе времени, что позволяет отображать потребности в ресурсах на каждую единицу времени, или в масштабе времени и пространства (во всех случаях с обязательным наложением и показом связей).

Прочие формы календарных графиков имеют в своей основе перечисленные. Более детально они рассматриваются в специальном курсе.

При выборе формы календарного графика для фиксации организации работ следует учитывать, что любой календарный график позволяет зафиксировать (с определенной степенью детализации) любую организацию работ. Как правило, выбор определяется только личным опытом (пристрастием к какой-либо форме) разработчика. Однако рассмотрение приведенной классификации показывает, что календарные графики существенно различаются между собой и применительно к конкретным условиям, определяющим, в частности, степень детализации работ и конкретности отображения места их выполнения, целесообразно использовать наиболее соответствующую им форму графика.

**Матрицы** — таблицы, в которых отражаются либо объемы работ, либо трудоемкости, либо продолжительности работ в их взаимосвязи и последовательности, либо сроки производства работ. В настоящее время матрицы получают все более широкое применение, так как они наиболее соответствуют вводу исходных данных и представлению выходных данных при выполнении всех расчетов на ЭВМ.

### ***Виды матриц***

Различаются следующие виды матриц (расчетных таблиц):

система **ОФР** (ордината — фронты работ, абсцисса — виды работ);

система **ОВР** (ордината — виды работ, абсцисса — фронты работ);

система **ОФРР** (ордината — фронты работ, абсцисса — ранги работ, то есть номера работ от начала);

система **ОВРР** (ордината — виды работ, абсцисса — ранги работ, то есть но-



мера работ от начала);

матрицы смежности, у которых на оси ординат и абсцисс выносятся одинаковые показатели.

Авторство матриц в системах ОФР, ОВР и смежности не установлено. Матрицы в системах ОФРР и ОВРР предложены в 80-х годах А.В. Афанасьевым в качестве средства для расчета предложенного им класса методов организации работ — рассредоточенных потоков, занимающих промежуточное место между известными последовательными и поточными методами организации работ.

Если матрицы рассредоточить и между работами показать связи, то матрицы превратятся в сетевые графики. На матрицах можно представить не только один вариант организации работ, но при необходимости и два — например, потоки с критическими работами (сетевые методы) при ранних и поздних сроках выполнения работ. Если существуют варианты, то обычно в **строкографах** наверху фиксируют ранние сроки, а внизу — поздние сроки выполнения работ.

Для иллюстрации структуры матриц и представления на них исходных данных (продолжительности и последовательности работ, видов работ и фронтальных комплексов) предположим, что необходимо выполнить четыре вида работ (А, Б, В, Г) на четырех частных фронтах (I, II, III, IV). Выполнение каждого вида работ на каждом частном фронте определяет понятие "работа". Продолжительность и последовательность работ (организационная) внутри каждого вида и (технологическая) внутри каждого фронтального комплекса работ (работ разных видов, выделяемых на отдельном частном фронте) представлены в соответствующих строкографах матриц (рис.1). Эти исходные данные будут затем использованы при формировании и оптимизации методов организации работ (МОР).

ОФР		Виды работ				
		А	Б	В	Г	$T_i$
Фронты работ	I	3	1	7	4	15
	II	2	2	9	3	16
	III	4	4	6	1	15

	IV	5	3	9	4	21
	$T_j$	14	10	31	12	67

ОВР		Фронты работ				
		I	II	III	IV	$T_j$
Виды работ	A	3	2	4	5	14
	Б	1	2	4	3	10
	В	7	9	6	9	31
	Г	4	3	1	4	12
	$T_i$	15	16	15	21	67

ОФРР		Ранги работ							
		1	2	3	4	5	6	7	$T_i$
Фронты работ	I	3	1	7	4				15
	II		2	2	9	3			16
	III			4	4	6	1		15
	IV				5	3	9	4	21

ОВРР		Ранги работ							
		1	2	3	4	5	6	7	$T_j$
Виды работ	A	3	2	4	5				
	Б		1	2	4	3			
	В			7	9	6	9		
	Г				4	3	1	4	

Рис. 1. Матрицы в системе ОФР, ОВР, ОФРР, ОВРР:  $T_j$  — продолжительность вида работ;  $T_i$  — продолжительность фронтального комплекса работ

Содержанием календарных графиков и матриц являются методы организации

работ. Они определяют взаимную увязку работ во времени и пространстве, характер поставки и использования ресурсов. Невозможно выполнение работ без какого-либо метода организации. Однако следует иметь в виду, что существуют самые различные методы организации работ, и успех может быть достигнут только тогда, когда из возможных конкурентоспособных вариантов будет выбран наиболее соответствующий конкретным условиям метод организации работ.

Когда какой-либо теории формирования и анализа методов организации работ еще не было, человечество работало по методу, который в настоящее время называется потоком с критическими работами или методом сетевого планирования (в варианте ранних сроков выполнения работ). Его характерной особенностью является немедленное начало каждой работы при наличии ресурсов и фронта работ.

В настоящее время теория формирования и анализа методов организации работ разработана. Она учитывает многочисленные **формообразующие** факторы (последовательность и совмещенность во времени разнотипных работ; одновременность однотипных работ, выполняемых на разных фронтах и т. д.). Большое влияние на формирования методов оказывают связи между работами. **Связи** — это то, что объединяет отдельные элементы в систему, устанавливает отношения, взаимные зависимости, обусловленности и, наконец, общности элементов в системе.

Существуют причинные, временные, структурные, конструктивные связи, связи общности и т. д.

Учет тех или иных связей во многом определяет формирование методов организации работ.

## **Глава 2. МЕТОДЫ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ**

**Методы организации работ**, то есть системы увязки работ во времени и пространстве, системы поставки и использования ресурсов, различаются по классификационным признакам.

Рассмотрим основные разновидности методов организации работ, применяе-

мых на отдельных объектах; их сущность и специфику; формирование, заключающееся в увязке работ во времени и пространстве расчет, предполагающий составление уравнений продолжительности комплекса работ и **определяющих** ее компонентов; оптимизацию, т. е. улучшение параметров по принятому критерию; оценку конкурентоспособных вариантов организации работ с целью выбора наиболее соответствующего конкретным условиям производства.

***Последовательный, параллельный, параллельно-последовательный и параллельно-поточный методы организации работ (МОР)***

**Последовательный метод** — это такой метод, когда в каждый момент времени выполняется только одна работа (в той или иной последовательности) без перерывов в производстве работ. При этом продолжительность комплекса работ (7) определяется суммой **продолжительностей** составляющих его отдельных работ ( $t_{ij}$ ).

$$T = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n t_{ij} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m t_{ij} = \sum_{q=1}^{m+n-1} t_{ijq},$$

где  $m$  — число  $i$ -х фронтов работ и соответственно фронтальных комплексов;  $n$  — число  $j$ -х видов работ (ресурсных комплексов);  $m + n - 1$  — число рангов работ, т. е. число туров (работы одного ранга — одного порядкового номера — образуют туры).

Проиллюстрируем это на примерах расчета.

Пусть даны следующие условия: 4 вида работ выполняются на 4 фронтах в установленной на матрицах (см. рис.1) последовательности и с указанной продолжительностью работ\*.

Требуется сформировать основные разновидности последовательного метода.

Последовательный метод организации работ может формироваться в следующих вариантах:

с непрерывным использованием ресурсов

$$T_1 = (3 + 2 + 4 + 5) + (1 + 2 + 4 + 3) + (7 + 9 + 6 + 9) + (4 + 3 + 1 + 4) = 67;$$

А                      Б                      В                      Г

с непрерывным освоением фронтов работ

$$T_2 = (3 + 1 + 7 + 4) + (2 + 2 + 9 + 3) + (4 + 4 + 6 + 1) + (5 + 3 + 9 + 4) = 67;$$

I                      II                      III                      IV

с непрерывным выполнением одноранговых работ (с прямыми ранговыми связями)

$$T_3 = (3) + (2 + 1) + (4 + 2 + 7) + (5 + 4 + 9 + 4) + (3 + 6 + 3) + (9 + 1) + (4) = 67;$$

1р    2р    3р                      4р                      5р                      6р    7р

с непрерывным освоением одноранговых работ (с обратными ранговыми связями)

$$T_4 = (3) + (1 + 2) + (7 + 2 + 4) + (4 + 9 + 4 + 5) + (3 + 6 + 3) + (1 + 9) + (4) = 67,$$

1р    2р    3р                      4р                      5р                      6р    7р

\* Целесообразно при изучении дисциплины обучаемому (читающему конспект) задаться исходными данными и решать собственные аналогичные примеры при каком-либо сочетании связей, например при следующем:

$$T_5 = (3 + 2 + 4 + 5) + (1 + 2 + 4 + 3) + (7 + 4) + (9 + 3) + (6 + 1) + (9 + 4) = 67.$$

A                      B                      I    II    III    IV

Последовательные методы, как правило, в чистом виде не применяются. Они входят составной частью в другие методы организации работ. Изменение очередности освоения фронтов работ на продолжительность комплекса в последовательном методе влияния не оказывает. При необходимости уменьшения продолжительности работ при последовательном методе следует увеличить число исполнителей по той или иной работе или виду работ, если такая возможность имеется, или изменить технологию производства работ.

**Параллельный метод** — это такой метод, при котором в одно и то же время на разных фронтах выполняются работы только одного вида. Однако при наличии двух и более видов работ параллельный метод перерастает в **параллельно-последовательный**.

В параллельно-последовательном методе работы каждого вида объединяются в туры, продолжительность которых определяется наиболее продолжительной в каждом туре работой (критической работой). Сумма **продолжительностей** критических работ (по одной в туре) определяет продолжительность всего комплекса работ

(T).

$$T = \sum_{j=1}^n t_{ij}^{\text{êò}},$$

где  $t_{ij}^{\text{êò}}$  — продолжительность критической (одной из критических) работы  $j$ -го вида, определяющая продолжительность  $j$ -го тура;  $n$  — число видов работ (число туров);  $m$  — число фронтов работ.

Меньшие по продолжительности (некритические) работы могут выполняться в ранние сроки, то есть начинаться вместе с началом критических работ, в поздние сроки, то есть оканчиваться вместе с критическими работами, и в промежуточные сроки. Проиллюстрируем это на примере расчета в вариантах ранних и поздних сроков выполнения работ (рис.2).

Изменение очередности освоения фронтов в данном методе на его продолжительность не влияет.

ОФР	А	Б	В	Г	$T_i$	Порядковые числа					
						0	5	10	15	20	25
I	0 3	5 6	9 16	18 22	22						
	3	1	7	4							
	2 5	8 9	11 18	18 22	20						
II	0 2	5 7	9 18	18 21	21						
	2	2	9	3							
	3 5	7 9	9 18	19 22	19						
III	0 4	5 9	9 15	18 19	19						
	4	4	6	1							
	1 5	5 9	12 18	21 22	21						
IV	0 5	5 8	9 18	18 22	22						
	5	3	9	4							
	0 5	6 9	9 18	18 22	22						

Крит. работы	5	4	9	4	22	Читателю рекомендуется вычертить календарный график (графики)
--------------	---	---	---	---	----	---

Рис. 7. Параллельно-последовательный МОР при ранних и поздних сроках выполнения некритических работ

**Параллельно-поточный метод** — это метод, допускающий одновременное выполнение как однотипных работ (элементы параллельности), так и разнотипных (элементы поточности). Его продолжительность (7) определяется наиболее продолжительным фронтальным комплексом, который приобретает статус критического.

$$T = \max T_i = \max \sum_{j=1}^n t_{ij},$$

где  $t_{ij}$  — продолжительность  $j$ -й работы на  $i$ -м фронте;  $n$  — число видов работ;  $m$  — число фронтов работ.

Работы некритических фронтальных комплексов могут выполняться в ранние и поздние сроки. Если при этом на каждую работу назначается определенная бригада, то данный метод гарантирует наименьшую продолжительность всего комплекса работ. Проиллюстрируем это на примере расчета в вариантах ранних и поздних сроков выполнения работ (рис.3).

Изменение очередности освоения фронтов в данном методе на его продолжительность не влияет.

ОФР	А	Б	В	Г	$T_i$	Порядковые числа					
						0	5	10	15	20	25
I	0 3	3 4	4 11	11 15	15						
	3 7 10	1 10 11	7 11 18	4 18 22	15						
II	0 2	2 4	4 13	13 16	16						
	2	2	9	3							

	6 8	8 10	10 19	19 22	16						
III	0 4	4 8	8 14	14 15	15						
	4	4	6	1							
	7 11	11 15	15 21	21 22	15						
IV	0 5	5 8	8 17	17 21	21						
	5	3	9	4							
	1 6	6 9	9 18	18 22	21						
Крит. Рабо- ты	5	4	9	4	22	Читателю рекомендуется вычертить календарный график (графики)					

Рис. 3. Параллельно-поточный МОР при ранних и поздних сроках выполнения не- критических работ

Поточный метод (поток) может формироваться и рассчитываться в вариантах с непрерывным использованием ресурсов (ПсНИР), непрерывным освоением фронтов (ПсНОФ), непрерывным выполнением цепочки работ, именуемых критическими работами (ПсКР).

Поточные методы организации работ применялись в строительстве извечно, но начали исследоваться сравнительно недавно (отечественными учеными), с 30-х годов, т. е. с момента начала индустриализации страны и массового строительства. Существенный вклад в развитие поточных методов в строительстве внесли М.С. Будников, С.А. Вутке, В.П. Горбушин, Н.И. Пентковский, А.И. Неровецкий, В.В. Чихачев и др. При этом прежде всего был предложен ритмичный поток, исключаящий простой как ресурсов, так и фронтов работ.

**Ритмичный поток** — это такой метод, при котором все работы имеют одинаковую продолжительность, определяющую его ритм.

$$r = t_{ij} - \text{const.}$$

При этом все бригады через определенный промежуток времени (ритм пото-



ка) переходят с одного частного фронта на другой, подготовленный предшествующей бригадой (рис.4).

ОФР	А	Б	В	Г	...	<i>n</i>
I	r	R	r	r		r
II	r	R	r	r		r
III	r		r	r		r
IV	r	R	r	r		r
...						
<i>M</i>	r	R	r	r		r

Рис.4. Ритмичный поток



I	0 3 3	7 8 1	8 15 7	31 35 4	35										
II	3 5 2	8 10 2	15 24 9	35 38 3	35										
III	5 9 4	10 14 4	24 30 6	38 39 1	34										
IV	9 14 5	14 17 3	30 39 9	39 43 4	34										
$T_j^p$	0	7	1	23											
$T_i$	14	10	31	12											
$T = (7+1+23) + (4+3+1+4)=43$						Читателю рекомендуется вычертить календарный график в форме циклограммы или линейной форме с показом фронтальных связей.									

Рис. 5. Поток с непрерывным использованием ресурсов  
(при выполнении каждого вида работ только одной бригадой)

Однако можно предварительно определить период развертывания последующего вида работ относительно предшествующего (величину сдвига), применительно к каждому частному фронту и принимать в расчет максимальный, исключаящий набегание работ последующего вида на работы предшествующего.

Расчетное значение  $T_j^p = \max T_{ij}^p$

$$T_{ij}^p = \sum_{q=1}^i t_{q(j-1)} - \sum_{q=1}^{i-1} t_{qj}$$

где  $T_{ij}^p$  — период развертывания  $j$ -го вида работ применительно к  $i$ -му фронту;  $t_{q(j-1)}$  — продолжительность работ предшествующего вида ( $j - 1$ ) на  $q$ -м частном фронте,  $t_{qj}$  — продолжительность работ рассматриваемого вида ( $j$ ) на  $q$ -м частном фронте,  $i$  — номер фронта работ, относительно которого определяется период развертывания.  $T_j^p$  — расчетное (максимальное) значение периода развертывания  $j$ -го вида

работ.

Продолжительность потока ( $T$ ) равна сумме периодов развертывания второго и последующих видов работ и продолжительности работ последнего вида:

$$T = \sum_{j=2}^n T_j^p + \sum_{i=1}^m t_{ni},$$

где  $T_j^p$  — продолжительность периода развертывания  $j$ -го вида работ;  $t_{ni}$  — продолжительность работы последнего ( $n$ -го) вида на  $i$ -м частном фронте;  $n$  — число фронтов работ;  $m$  — число видов работ.

### ***Формирование и расчет потоков с непрерывным освоением фронтов***

Одновременно с разработкой и внедрением поточного метода в строительстве Петровым, Тепловым и др. был разработан и использовался поточный метод в машиностроении — как метод, обеспечивающий непрерывную обработку деталей, то есть метод с непрерывным освоением фронтов работ.

К сожалению, длительное время поточный метод с непрерывным освоением фронтов не использовался в строительстве. Однако он представляет несомненный интерес, особенно при ремонте и реконструкции объектов, так как обеспечивает наименьшую продолжительность выполнения работ на объекте. Расчет потока с непрерывным освоением фронтов работ может осуществляться на матрице в системе **ОФР**, но лучше транспонировать матрицу в систему **ОВР**. В последнем случае методика расчета потока с непрерывным освоением фронтов работ аналогична расчету потока с непрерывным использованием ресурсов, но обеспечивается нулевое растяжение не ресурсных, а фронтальных связей. При этом, как правило, имеют место простои ресурсов.

Продолжительность потока с непрерывным освоением фронтов равна сумме периодов развертывания второго и последующих фронтальных комплексов работ и продолжительности работ последнего фронтального комплекса:

$$T = \sum_{i=2}^n T_i^p + \sum_{j=1}^m t_{jm}.$$

Проиллюстрируем расчет данного потока на примере (рис. 6).

ОФР	I	II	III	IV	$T_j$	Порядковые числа											
						0	5	10	15	20	25	30	40	45			
A	0 3 3	7 9 2	12 16 4	18 23 5	23												
Б	3 4 1	9 11 2	16 20 4	23 26 3	23												
В	4 11 7	11 20 9	20 26 6	26 35 9	31												
Г	11 15 4	20 23 3	26 27 1	35 39 4	28												
$T_i$	0	7	5	6													
$T_i$	15	16	15	21													
$T = (7+5+6) + (5+3+9+4)=39$					Читателю рекомендуется вычертить календарный график в форме циклограммы или линейной форме с показом ресурсных связей.												

Рис. 6. Поток с непрерывным освоением фронтов работ

Наряду с рассмотренными разновидностями потока в практике строительства широко применяются потоки с немедленным началом каждой последующей работы после завершения предшествующей при наличии ресурса и фронта работ, то есть традиционный метод организации работ, который был дополнен в 1957 году [Дж.Е. Келли](#) и [М.Е. Уолкером](#) (США) вариантом организации работ при поздних сроках (при сохранении продолжительности потока). Это позволило выявить критические работы, составляющие критический путь (критические пути), и метод получил название метода критического пути, а позднее — метода сетевого планирования (последнее название не является точным, но получило наибольшее распространение).

**Поток с критическими работами, выявленными  
с учетом ресурсных и фронтальных связей**

Поток с критическими работами, выявленными с учетом только ресурсных и фронтальных связей, является одной из разновидностей потоков с критическими работами. В общем виде продолжительность этих потоков ( $T$ ) определяется суммой продолжительностей критических работ, составляющих критический путь (один из критических путей):

$$T = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n t_{ij}^{\text{êò}},$$

где  $t_{ij}^{\text{êò}}$  — продолжительность критической работы  $ij$ , у которой ранние и поздние сроки выполнения одинаковы. Критическими работами всегда являются только первая и последняя, остальные определяются в зависимости от разновидности метода;  $n$  — число видов работ;  $m$  — число фронтов работ.

Проиллюстрируем расчет данного потока на примере (рис. 7).

ОФР	А	Б	В	Г	$T_i$	Порядковые числа									
						0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
I	0 3	3 4	4 11	11 15	15										
	3	1	7	4											
	0 3	3 4	4 11	27 31	31										
II	3 5	5 7	11 20	20 23	20										
	2	2	9	3											
	7 9	9 11	11 20	31 34	27										
III	5 9	9 13	20 26	26 27	22										
	4	4	6	1											
	12 16	16 20	20 26	34 35	23										
IV	9 14	14 17	26 35	35 39	30										
	5	3	9	4											
	18 23	23 26	26 35	35 39	21										
$T_i^{\text{òñ}}$	14	14	31	28		Читателю рекомендуется вычертить календар-									

$T_i^{i \bar{n}}$	23	23	31	12	ный график в форме графа или с показом ресурсных и фронтальных связей и выделением критических работ
-------------------	----	----	----	----	--

Рис. 7. Поток с критическими работами, выявленными с учетом ресурсных и фронтальных связей при ранних сроках работ (в верхней части **строкографов**) и поздних сроках (в нижней части строкографов)

Приведенная на рис. 7 в правой части графика календарная сеть позволяет представить поток с критическими расчетами в масштабе времени в варианте ранних или поздних сроков производства работ. Однако сетевой метод предполагает также возможность его представления графиком вне масштаба времени, но с обязательным показом ресурсных и фронтальных связей.

Алгоритм расчета потока с критическими работами, выявленными с учетом ресурсных и фронтальных связей, включает в себя следующие шаги расчета (этапы):

1-й шаг расчета — определение ранних сроков работ первого вида при нулевом растяжении прямых конечно-начальных ресурсных связей;

2-й шаг расчета — определение ранних сроков работ первого фронтального комплекса при нулевом растяжении прямых конечно-начальных фронтальных связей;

3-й шаг расчета — определение в соответствии с предоставляющейся возможностью ранних сроков остальных работ при одновременном учете прямых конечно-начальных ресурсных и фронтальных связей и принятии в качестве расчетного (раннего начала работы) максимального из определяемых этими связями срока;

4-й шаг расчета — принятие раннего срока окончания последней в потоке работы в качестве ее позднего срока, позволяющего определять поздние сроки всего комплекса работ;

5-й шаг расчета — определение поздних сроков работ последнего вида при нулевом растяжении обратных начально-конечных ресурсных связей;

6-й шаг расчета — определение поздних сроков работ последнего фронтального комплекса при нулевом растяжении обратных начально-конечных фронтальных связей;

7-й шаг расчета — определение в соответствии с предоставляющейся возможностью поздних сроков остальных работ при одновременном учете обратных начально-конечных ресурсных и фронтальных связей и принятии в качестве расчетного (позднего окончания работы) минимального из определенного этими связями срока;

8-й шаг расчета — выявление критических работ как работ, не имеющих резерва времени, то есть как работ, у которых ранние и поздние сроки совпадают.

Потоки с критическими работами, выявленными с учетом ресурсных и фронтальных связей, при прочих равных условиях гарантируют минимальную продолжительность всего комплекса работ. Однако при этом, как правило, имеют место простои (резервы времени) ресурсов и фронтов работ.

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ПОТОКОВ ПО КРИТЕРИЮ ВРЕМЕНИ**

Как известно [1] оптимизация потоков, т. е. их улучшения (по принятому критерию) может производиться при полном переборе возможных очередностей освоения фронтов работ (при небольшом числе фронтов), с использованием ускоренных эвристических алгоритмов и по строгим (математически доказанным) алгоритмам, позволяющим выявить в каждом конкретном случае все оптимальные очередности освоения фронтов, обеспечивающие минимальную продолжительность потоков.

При осуществлении помимо перебора всех очередностей возникает вопрос о выявлении самих очередностей. Это может быть осуществлено путем построения “дерева цели” или иначе “дерева вариантов”, предложенного монахом Порфирием в III веке нашей эры (с целью избежания повторов в рассуждениях). Термин “дерево” широко используется в математике при изучении метода “ветвей и границ”. Однако в последние годы, этот термин заменяется термином “порфириан” (т.е. по имени разработчика “дерева целей” или “дерева вариантов”).

Алгоритм построения порфириана заключается в следующем. В качестве ос-



новы принимается исходная очередность освоения фронтов работ (I, II, III, IV). Затем на первом шаге построения формируются четыре (в данном случае) “ветви” (направлении) развития порфириана, возглавляемые в первом случае I-ым фронтальным комплексом; во втором – II-м; в третьем – III-им; в четвертом – IV-ым (и т. д., если фронтальных комплексов более четырех). На втором шаге построения каждая “ветвь” разветвляется (направление разчленяется) на три, а именно – первая “ветвь” (первое направление) на I, II; I,III; I,IV; вторая – на II,I; II,III; II,IV; третья – на III,I; III,II; III,IV. На третьем шаге построения каждая “ветвь” разветвляется (направление разчленяется) на две, а именно: ветвь I,II на I,II,III и I,II,IV; ветвь I,III на I,III,II и I,III,IV и т. д. На четвертом шаге построения формируются все возможные очередности освоения фронтов путем дополнения сформированных на третьем шаге очередностей недостающими.

Таким образом, в случае формирования возможных очередностей освоения фронтов в потоке, состоящем из четырех фронтальных комплексов имеют место следующие 24 варианта: I,II,III,IV; I,II,IV,III; I,III,II,IV; I,III,IV,II; I,IV,II,III; I,IV,III,II; II,I,III,IV; II,I,IV,III; II,III,I,IV; II,III,IV,I; II,IV,I,III; II,IV,III,I; III,I,II,IV; III,I,IV,II; III,II,I,IV; III,II,IV,I; III,IV,I,II; III,IV,II,I; IV,I,II,III; IV,I,III,II; IV,II,I,III; IV,II,III,I; IV,III,I,II; IV,III,II,I.

Разумеется, что при внимательном рассмотрении представленной системы очередностей освоения фронтов выявляется динамика ее построения и отпадает необходимость графического построения “дерева” (порфириана).

Однако полный перебор и расчет всех вариантов потока весьма трудоемок и практически применяется только при незначительном числе фронтов (фронтальных комплексов), т. к. число вариантов равно факториалу от числа фронтов.

Поэтому жизнь, практика потребовали разработки алгоритмов направленного перебора, уменьшающих число рассматриваемых вариантов организации работ. Появились многочисленные эвристические алгоритмы поиска рациональных и весьма ограниченное число строгих (математически доказанных) алгоритмов поиска оптимальных очередностей освоения фронтов, обеспечивающих нахождение минимальной продолжительности потоков.

Эвристические (от греч. *heureka* – “я нашел”, – восклицания, приписываемого

Архимеду при открытии им основного закона гидростатики) алгоритмы не гарантируют выявления оптимальных и тем более всех оптимальных очередностей освоения фронтов и соответственно, минимальной продолжительности потока. Однако они, как правило, полезны, т. к. позволяют выявить более эффективные (чем исходная) очередности, обеспечивающие меньшую (чем при исходной) продолжительность потока.

В качестве эвристического алгоритма можно принять не полный перебор всех вариантов, а только четные или нечетные варианты, или рассматривать каждый 3-ий, 5-ый, 10-ый, 100-ый, 1000-ый и т. д. вариант. Однако лучшие, т. е. оптимальные варианты могут выпасть из рассмотрения. Поэтому представляют интерес эвристические алгоритмы, содержащие в себе определенную логику поиска лучшего варианта. К такого рода эвристических алгоритмов относится алгоритм А.В. Афанасьева (1), который относится к классу предельно ускоренных алгоритмов.

Данный алгоритм предусматривает представление исходных данных (продолжительности и последовательности работ) на матрице в системе ОФР и формирование рациональной структуры потоков путем выявления наиболее продолжительного вида работ и закрепления на первом и последнем месте (местах) в очереди фронтальных комплексов с минимальными предшествующими и последующими работами и повторения цикла до полного перестроения всех фронтальных комплексов.

Проиллюстрируем работу алгоритма на конкретном примере с исходными данными приведенными на матрице (рис.8).

	Виды работ				
ОФР		А	Б	В	Г
Фронты	I	3	1	7	4
	II	2	2	9	3
	III	4	4	6	1
	IV	5	3	9	4
Сумма		14	10	31	32

Рассмотрение исходных данных показывает, что наиболее продолжительным

видом работ является “В” ( $T_B=31$ ). Разместим на первом месте в очереди в одном случае 1-ый фронтальный комплекс ( $3+1 = 4$ ), а в другом II-ой ( $2+2=4$ ).

На последнее место установим в обоих случаях III-ий фронтальный комплекс ( $t_{III} = 1$ ). Следовательно в качестве рациональных очередностей определились I,III,IV,III и II,I,IV,III.

При этих рациональных очередностях продолжительности потока оказались меньше, чем при исходной очередности (табл.8). но доказать, что выявлены самые лучшие нельзя. Поэтому необходимо продолжить поиск рациональных и оптимальных очередностей.

Таблица 1

№ п/п	Очередности	Разновидности потоков					
		С НИР	с НОФ	с КР, при рес. и фр. связях	с КР, при рес., фр.и пр. ранг. св.	с КР, при рес., фр. и об. Ранг. св.	с ОРТ
1	I,II,III,IV	43	39	39	40	39	40
2	I,II,IV,III	41	36	36	37	36	37
3	II,I,IV,III	42	36	36	37	36	37

### ***Оптимизация потоков с критическими работами***

В потоках с критическими работами, выявленными с учетом ресурсных и фронтальных связей используется при выявлении оптимальных очередностей освоения фронтов алгоритм В.А. Афанасьева и В.З. Величкина [1]. Он же используется при оптимизации потоков с критическими работами в вариантах учета ресурсных, фронтальных и прямых ранговых связей, а также ресурсных, фронтальных и обратных ранговых связей. Некоторое различие имеет место только при расчете конечных (реальных) матриц, когда учитывается соответствующее сочетание ресурсных, фронтальных и ранговых связей. Вместе с тем продолжается разработка новых алгоритмов уменьшающих трудоемкость расчетных операций.

Предложены новые алгоритмы рассмотренный выше эвристический

(А.В. Афанасьева) и строгий математически доказанный (В.А. Афанасьева) . ,

Предельно ускоренный эвристический алгоритм А.В. Афанасьева.– это по сути дела тот же алгоритм, который рассмотрен выше при оптимизации потоков с НИР и с НОФ. Он выявил в качестве рациональных очередностей I,II,IV,III и II,I,IV,III.

Здесь обе очередности равноценны. Им соответствует продолжительность вариантов потока, равная 36 единицам времени.

Пример использования данного алгоритма.

1 шаг. Формируется матрица с исходными данными и выявляется наиболее продолжительный вид работ (здесь вид “В”  $T_B = 31$ ).

2 шаг. Формируются пары фронтальных комплексов при всех их сочетаниях и определяются периоды свертывания потоков, т. е. разница между сроками окончания последующего и предшествующего фронтальных комплексов. Полученные данные фиксируются в матрице смежностей – матрице периодов свертывания.

При приобретении навыка расчетов можно парные матрицы не выписывать, а определять периоды свертывания непосредственно на исходной матрице и фиксировать их в матрице смежностей.

Действительно, необходимо в каждой паре фронтальных комплексов (например, 1-11) определить сумму продолжительностей работ, входящих в определяющий (наиболее продолжительный) вид работ и последующих ( $9+3 = 12$ ) и вычесть продолжительность завершающих (после работы определяющего вида) работ в предшествующем комплексе (4). т. е.  $12-4=8$ . Это и есть период свертывания. Такую операцию легко провести по отношению ко всем сочетаниям фронтальных комплексов.

3 шаг. Определение рациональных очередностей освоения фронтов

$$T_{I,III,II,IV} = 3+11+10+21 = 45; T_{II,III,I,IV} = 4+10+9+21 = 44;$$

$$T_{III,I,II,IV} = 10+8+10+21 = 49; T_{IV,III,I,II} = 3+10+8+16 = 37.$$

В данном случае в качестве рациональной очередности потока с КР, выявленными с учетом ресурсных и фронтальных связей выступает очередность P/III,II,II, которой соответствует продолжительность потока равная 37 ед. времени. Ксожалению

нию данная очередность является только рациональной, т. к. оптимальным очередностям в рассматриваемых условиях соответствует продолжительность потока равная 36 ед. времени.

Таким образом поиск новых точных и эвристических методов организации работ продолжается.

## **Часть 2. Модели параллельно-поточной организации работ. Специфика применения к специальным строительным и проект- ным работам.**

### **Глава 1. Основные понятия. Критерии оптимизации календарных планов строительных и проектных работ.**

Параллельно-поточные методы являются более сложными и менее изученными по сравнению с индивидуально-поточными.

В строительстве параллельно-поточная организация работ применяется в тех случаях, когда: 1) все возможности сокращения срока строительства в индивидуальных потоках исчерпаны, однако необходимость их дальнейшего сокращения остается; 2) в строительной организации имеется неодинаковое число однотипных бригад. Перечисленные случаи применения параллельно-поточной организации работ являются достаточно общими и, как показывает опыт, характерны также для проектирования объектов строительства.

Целым рядом исследователей под руководством В.А. Афанасьевым велась интенсивная научная разработка теории и методики расчета параллельно-поточной организации работ. Оригинальные результаты исследований приведены в работах (2,9, 10). В данном методическом пособии рассматриваются особенности параллельно-поточной организации проектных и специальных строительных работ.

Конкретная производственная ситуация выдвигает, как правило, определенные требования к выбору варианта календарного плана (расписания). Отсюда возникает задача поиска оптимального по принятому критерию расписания.

Существует множество критериев оптимальности календарных планов. Однако из самых распространенных является критерий, требующий поиска расписания с наименьшей длительностью выполнения всего комплекса работ (производственного цикла). Он используется, в частности, в качестве критерия оптимизации в ис-

следованиях по календарному планированию строительно-монтажных и опытно-конструкторских работ(2, 9).

В большинстве трудов по календарному планированию строительно-монтажных работ в качестве критерия оптимизации выбираются характеристики, отражающие неравномерность использования ресурсов(1,7, 14). При этом под распределяемыми ресурсами понимаются рабочие или проектировщики различных специальностей. Эти ресурсы обладают свойством возобновляемости и относятся к ресурсам 2 рода (нескладируемых и возобновляемых) в отличие от ресурсов 1 рода(складируемых и невозобновляемых). При этом каждая отдельная работа потребляет, как правило, один вид таких ресурсов. На интенсивность потребления ресурса определенного вида отдельной работой могут накладываться различные ограничения.

Каждому календарному плану реализации комплекса и каждому из распределяемых ресурсов соответствует функция, выражающая суммарную интенсивность потребления ресурса в каждый момент времени.

Целевую функцию полагают «ступенчатой», т.е. постоянной на каждом элементарном промежутке времени (день, неделя, месяц, и т.д.).

Количественный показатель неравномерности использования ресурса, является, как правило, средней оценкой.

При необходимости учета двух и более видов ресурсов используются два способа.

В первом способе выравнивания сначала учитывают лишь один (в каком-то смысле наиболее важный) вид ресурса и оптимизируют его использование. Затем, фиксируя достигнутое значение показателя использования этого ресурса, переходят к учету следующего (в соответствии с принятым приоритетом). При этом отыскивают календарные планы, оптимизирующие использование второго ресурса и не ухудшающие (или ухудшающие не более чем на заданную величину) показатель качества использования первого вида ресурса и т.д. (4, 14).

При втором способе выравнивания применяются «взвешенные» показатели качества использования всего множества учитываемых ресурсов. Оценка значимости отдельных видов ресурсов производится путем присвоения каждому из них некоторого числового параметра (веса множителя) и построения с помощью этих параметров единого показателя качества.

Анализ приведенных критериев оптимальности календарных планов и практического опыта их использования показывает, что они способствуют сокращению сроков выполнения работ и (или) равномерности использования ресурсов. Однако они носят частный характер и не обеспечивают достижения лучших результатов по всей совокупности технико-экономических показателей выполняемых работ. Часто сокращение сроков работ достигается при одновременном ухудшении других показателей, а стремление к равномерному потреблению ресурсов приводит к ухудшению сроков выполнения работ.

Рассматриваемые задачи календарного планирования специальных строительных и проектных работ являются многоцелевыми. К календарному плану, как правило, предъявляются сразу несколько технико-экономических или организационно-технологических требований, выражаемых функциями, зависящими от параметров

расписаний. С целью учета этих требований в (6) предлагается в качестве критерия рассматривать некоторый функционал, представляющий сумму этих функций с приоритетными весовыми коэффициентами. Однако этот прием не всегда эффективен, так как содержательный смысл отдельных функций может быть с экономической точки зрения различен и несравним. Это затрудняет поиск наилучшего сочетания весовых коэффициентов(16).

В настоящее время наиболее рациональным режимом оценки качества календарных планов признается диалоговый (5, 8,14). Использование диалогового режима для построения и оценки календарного плана предполагается в современных программных комплексах по управлению проектами(17). По мнению Г.С. Поспелова (15), это объясняется следующим:

сложностью плановых задач, необходимостью учета многих целей при принятии решений, что не позволяет полностью формализовать все стадии принятия решений;

опасностью получения неудовлетворительного первоначального варианта, решения календарного плана и отсутствием ясности путей получения более удовлетворительного варианта плана.

Опыт показывает, что процесс выработки плановых решений носит итеративный характер: уточнение или изменение исходных данных и анализ промежуточных результатов проводятся неоднократно, прежде чем будет получен сбалансированный план, удовлетворительный с точки зрения различных заинтересованных органов планирования и управления.

Е.С. Вентцель в (5) отмечает, что математические методы должны помочь людям принимать решения, а не заменять их в том, что человек делает сейчас лучше, чем машина. Математические традиции требуют участия человека в исследовании только на этапе постановки задачи. Однако такая сложная задача как процесс выбора решений с помощью ПЭВМ требует постоянного участия человека, который вмешивается в ход исследований, меняет в случае необходимости критерии и, наконец, принимает решения.

Существующие методы решения задач календарного планирования подразделяются на точные и приближенные. К числу точных методов относятся: сведение задачи календарного планирования к целочисленной задаче линейного программирования; использование комбинаторных методов (направленного перебора, последовательного конструирования, анализа и отсеивания вариантов, а также метод ветвей и границ).

Общие методы решения задач линейного программирования, геометрическая и экономическая трактовка этих задач, были разработаны в 30-е годы академиком Л.В. Канторовичем. В 1955-1979гг. линейное программирование интенсивно развивалось и в настоящее время представляет собой наиболее законченный раздел математического программирования. Применению целочисленного линейного программирования в задачах календарного планирования посвящено большое количество работ(11,14) и др. Несомненным достоинством моделей линейного, линейного целочисленного и квадратичного целочисленного программирования является возможность отразить в них многие важнейшие ограничения задач календарного планирования.

Однако решение методами линейного программирования дискретных задач

ярко выраженного комбинаторного типа приводит к матрицам очень большой размерности. Кроме того, линейные модели недостаточно четко отражают динамику производственных процессов, а искусственные приемы их учета также ведут к неоправданному увеличению задачи.

Попытки решения задачи календарного планирования методами динамического программирования не привели к желаемому результату. Так, в (13) отмечается, что для строгой реализации подхода, основанного на методе динамического программирования, в случае составления расписания из 1000 работ потребуется время, «сравнимое со временем существования нашей галактики»....Использование даже сверхбыстродействующей гипотетической техники мало что изменит в существе вопроса. Время для нахождения точного решения все равно будет иметь астрономический порядок.

Одним из распространенных комбинаторных методов решения задачи календарного планирования является метод ветвей и границ. Суть метода ветвления заключается в построении такого способа развития вариантов и такой оценочной функции, которые позволили бы отбрасывать бесперспективные ветви еще до полного их развития. Это существенно уменьшает объем перебора и вычислительной работы. Алгоритмы направленного перебора, основанные на методе ветвей и границ, приводятся в работах(3,12). Предложенные в большинстве работ алгоритмы носят локальный характер и соответствуют только определенным методам организации работ, в основном, методу с непрерывным использованием ресурсов.

Так, например, в (11) приведен алгоритм выбора рациональных очередностей освоения частных фронтов для принятого на практике метода организации специальных строительных и проектных работ с критическим путем, выявленным при учете ресурсных и фронтальных связей.

Сущность алгоритма сводится к следующему. Наиболее продолжительный строительный комплекс (главный) выбирается по сумме определяющих( максимальных по времени) операций в каждом специализированном виде работ.

При выявлении наименьших из возможных предшествующих и завершающих операций главного частного комплекса рассматриваются операции, выполняемые теми же бригадами, что и определяющие.

Для иллюстрации работы алгоритма рассмотрим следующий пример. Пусть имеется комплекс строительных работ, описанный матрицей (рис.2.1), в строкографах которой указаны продолжительности выполнения работ по объекту. При этом в соответствии с особенностями технологии процесса строительства группы объектов каждый последующий вид работ может быть начат только после окончания всех работ предыдущего вида, а все работы внутри видов могут выполняться одновременно различными бригадами специалистов.

Произведен расчет рациональной очередности проектирования объектов согласно указанному алгоритму и дополнений к нему. Результаты расчета представлены на (рис.2.2). Поиск рациональных очередностей обеспечил снижение планируемой продолжительности комплекса работ с 56 до 51 единицы времени, то есть на 9%.

В настоящее время точные комбинаторные методы типа метода ветвей и границ, неявного перебора, последовательного конструирования, анализа и отсеивания вариантов в чистом виде при достаточной степени ритмичности потока применя-



ются лишь для частных и небольших по размеру задач календарного планирования. Это объясняется слишком большим количеством вариантов и «заготовок» решений (частных решений) на разных уровнях деревьев переборных, а также тем, что для задач рассматриваемого типа не удастся построить эффективные способы оценки перспективности вариантов.

Вид работ	Вид А			Вид Б			Вид В														
Фронты 1	0	9	9	0	5	5	9	3	12	9	2	11	9	1	10	11	6	17	11	2	13
2	9	13	22	5	5	10	22	4	26	22	5	27	22	8	30	30	2	32	30	16	46
3	22	8	30	10	10	20	30	8	38	30	9	39	30	2	32	32	11	43	32	3	35
4	30	4	34	-----	38	3	41	39	2	41	34	7	41	43	5	48	49	7	56		

Рис. 2.1. Расчетная матрица

$$T_{1,2,3,4} = 56$$

$$ПВМП(1)=53 \quad ПВМП(2) = 49 \quad ПВМП(3) = 51 \quad ПВМП(4) = 46$$

$$ПВМП(2,1)= 54 \quad ПВМП(2,3)=52 \quad ПВМП(2,4)=51 \quad ПВМП(4,1)= 53$$

$$ПВМП(4,2)=46 \quad ПВМП(4,3) = 51$$

$$ПВМП(3,1) = 57 \quad ПВМП(3,2)=52 \quad ПВМП(3,4) = 54$$

$$T(2,4,1,3)=51 \quad T(2,4,3,1) = 51 \quad T(4,2,1,3)=54 \quad T(4,2,3,1)=51$$

$$T(4,3,2,1)=51$$

Рис.2.2. Дерево поиска рациональных очередностей освоения фронтов работ

В связи с этим совершенствование известных и разработка новых точных методов оптимизации продолжает быть актуальными.

Необходимость решения на практике задач достаточно большой размерности привела к созданию эвристических алгоритмов. Они используются в большинстве методик по календарному планированию проектных и строительных работ и являются наиболее приемлемыми для решения большинства реальных задач на производстве.

В эвристический алгоритм обычно закладываются правила, делающие его похожим на метод «ветвей и границ» в теории оптимизации, с той разницей, что на основании эвристического правила отсекаются некоторые ветви без строго исследования всех вариантов. Это чрезвычайно сокращает перебор и делает реальным решение задач на ЭВМ.

Основные отличия эвристических методов от точных заключаются в следующем:

1. Принципиально разную роль играет понятие целевой функции ( или функций в случае многокритериальной задачи). В случае решения задачи точными методами все время происходит сравнение целевой функции для разных планов и планы направленно перебираются в направлении оптимальной траектории. Целевая функция служит критерием оптимальности плана. При использовании эвристических методов целевая функция служит для оценки качества плана в процессе нахождения решения: предполагается, что сами эвристические правила направлены на получение удовлетворительных значений целевой функции. В реальном производстве обычно оценка плана ведется по системе показателей, иногда противоречивых. При этом для каждого из них существует диапазон удовлетворительных значений. Таким образом, эти показатели выступают в качестве ограничений, а не критериев.
2. При использовании эвристических методов отыскивается, по существу, не оптимальное, а допустимое решение. При этом понятие допустимости может быть расширено, например, в случае невозможности уложиться в директивные сроки можно допустить перегрузки.

Появляются специфические понятия – эвристические функции предпочтения, представляющие собой совокупность правил, по

которым происходит перебор вариантов. Различные варианты функций предпочтения для задач календарного планирования приведены в ( 11 , 12) . Эффективность и адекватность эвристических методов определяется выбором функций предпочтения. В (16) впервые предложен статистический метод проверки эффективности функций предпочтения.

Функции предпочтения определяют приоритеты работ, т.е. очередность их включения в план. В (15) приведена классификация функций предпочтения ( например, приоритет может быть одним и тем же в течение всего процесса принятия решения, может пересчитываться на каждом

шаге расчета и т.д.). Может быть несколько функций предпочтения для разрешения конфликтной ситуации, так как конфликт должен обязательно разрешаться однозначно. При этом они образуют несколько ступеней, каждая из которых после-

довательно вступает в действие, если конфликт не разрешается на предыдущем уровне. Так, в большинстве работ по календарному планированию приоритеты работ определяются на основе следующих последовательно учитываемых правил:

- а) продолжающиеся или начатые работы предпочитаются остальным;
- б) предусматривается учет критичности работ, т.е. упорядочение их по возрастанию полных резервов времени;
- в) учитывается важность проектов.

Отметим также, функции предпочтения можно задавать не аналитическими выражениями (в отличие от точных методов, где целевая функция и функции ограничений должны иметь аналитические выражения), непосредственно в описательной форме, в виде логических правил. Это позволяет достаточно просто осуществить их машинную реализацию.

По способу составления расписания применяемые в практике планирования проектных работ и строительства эвристические алгоритмы можно условно классифицировать как алгоритмы типа «Сглаживание» и «Калибровка» по наименованию первых алгоритмов данного типа, созданных в 60- годах в Гипротисе и НИИ-АСС Госстроя УССР.

При формировании календарных планов по эвристическому алгоритму типа «Сглаживание» в определенной очередности, зависящей от конкретного алгоритма, составляется расписание выполнения всех работ по объекту.

При формировании календарного плана по эвристическому алгоритму типа «Калибровка» в определенные моменты времени планируемого периода осуществляется просмотр списка подготовленных к выполнению работ разных объектов и далее тем или иным способом, в зависимости от конкретного алгоритма, решается вопрос о включении работы в расписание.

Эвристические алгоритмы типа «Калибровка» и «Сглаживание» реализованы в пакетах по управлению проектами Time Line и Project Management(17).

Таким образом, рассмотрение вопросов специфики задач календарного планирования и их экономико –математических моделей свидетельствует о предпочтительности эвристических алгоритмов, так как их применение олицетворяет своеобразный компромисс возможностей существующих методов, средств и целей календарного моделирования на производстве.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аннотированный перечень программных средств межотраслевого применения. / Сост. Тихомирова Б.А. и др. – М.: ЦНИИпроект, 1983. –144 с.
2. Афанфсьев В.А. Поточная организация строительства. Л.: Стройиздат, 1990.-300с.
3. Ахьюджа. Сетевые методы управления в проектировании и производстве. –М.: Мир, 1979.-638 с.
4. Борисов А.В. Основы разработки и функционирования некоторых подсистем АСУ проектным производством крупных подразделений. М.: Стройиздат, 1976.-145 с.
5. Вентцель Е.С. Исследование операций. – М.: Советское радио,1972.-551 с.
6. Власов М.П. Автоматизированное формирование годового плана проектного института. Строительные материалы, 1981, 9 , с. 10-11.
7. Волков Б.А. Экономические проблемы совершенствования управления ПИР в транспортном строительстве: Автореф. Дис....д-ра экон. Наук. – М.: МИИТ, 1981. – 37 с.
8. Гусаков А.А. Системотехника строительства. – М.: Стройиздат, 1983.-440 с.
9. Драпеко В.Г. Особенности формирования параллельно поточных методов организации работ. Межвуз. тмат. Сб.-Л.: ЛИСИ, 1982, с.22.
10. Драчев Е.А., Крылов Г.В. О формировании параллельных потоков в строительстве. Межвуз. темат. Сб.Л-ЛИСИ, 1983, с.6
11. Конвей Р.В., Максвелл В.Л., Миллер Л. В. Теория расписаний. Пер. с англ. –М.: Наука, 1975.-359 с.
12. Куперман А.И., Лившин И.А. Комплекс алгоритмов формирования оптимального варианта плана работы проектного института. М.: ЦНИПИАСС, 1973-14 с.
13. Моисеев Н.Н. Элементы теории оптимальных систем.-М.: Наука, 1986.-528 с.
14. Пospelов Г.С. Проблемы программно-целевого планирования и управления. – М: Наука, 1981.-446 с.
15. Шафранский В.В. Математические модели и методы планирования развития отраслей промышленности. – М.: Наука, 1984.-224 с.
16. Эвристические методы календарного планирования /Подчассова Т.П., Португал В.М., Шкурба В.В.- Киев: Техника,1980. –144 с.
17. Управление проектами./Кочетков А.И, Никешин С.Н., Рудаков В.П.- Два-Три, С-Пб.-420 с.

