

Упорядочение рабочих операций простых технологических процессов в строительстве

К.т.н, доцент М. М. Калюжнюк,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет;
учащийся А. В. Калюжнюк,
ГОО лицей 572*

Ключевые слова: рабочая операция; простой технологический процесс; организационно-технологический модуль; метод теории графов; экспертное оценивание; сетевое планирование и управление

Введение

В современных планах развития экономики Российской Федерации предусматривается в ближайшие годы достижение ею уровня передовых развитых стран благодаря всесторонней поддержке приоритетных направлений развития науки [1,2] и внедрению критических технологий [2] во все отрасли хозяйства.

В строительной отрасли, как и во всей экономике, также следует ожидать существенных преобразований [3]. В этих преобразованиях должна быть предусмотрена, в частности, автоматизация системы организационно-технологической подготовки строительного производства, основной частью которой является оперативно-производственное планирование.

Для осуществления полномасштабной автоматизации, повышения эффективности, надёжности и достоверности календарного планирования и управления строительством требуется адаптировать к современному уровню использовавшиеся ранее средства календарного планирования и дополнить их разработкой и внедрением новых математических методов, компьютерных и телекоммуникационных технологий.

Поскольку в силу специфических особенностей строительство в своём развитии почти всегда с некоторым запаздыванием следует направлениям, по которым развивается промышленность, при решении этих задач следует учитывать передовой опыт автоматизации систем организационно-технологической подготовки промышленного производства и оперативно-производственного управления технологическими процессами, ориентируясь на развитые мировые экономики [4 и др.].

Автоматизацию подготовки строительного производства авторы предлагают выполнять по следующим направлениям:

- структурно-функциональное моделирование строительных процессов [5,6], в котором предусматривается разделение общей организационно-технологической модели возведения объекта на взаимосвязанные структурную и функциональную модели;
- формализация методов упорядочения структурных моделей процессов возведения объектов и их базовых структурных единиц – простых технологических процессов [6];
- разработка формализованных методов упорядочения рабочих операций, входящих в состав простых технологических процессов, и на их основе формирование организационно-технологических модулей (см. ниже), наиболее значимыми характеристиками которых являются нормы затрат труда и/или машинного времени их исполнителей;
- разработка автоматизированных систем формирования и поддержания в актуальном состоянии характеристик организационно-технологических модулей простых технологических процессов и, в первую очередь, баз данных норм затрат труда (или выработки) и машинного времени (или производительности), служащих основой оперативно-производственного планирования и управления;
- разработка функциональных моделей возведения объектов – оптимизационных и субоптимизационных методов и алгоритмов вариантного календарного планирования работы трудовых и/или технических ресурсов (включая вспомогательные, сопутствующие, транспортные и другие обслуживающие процессы) на проектируемых объектах.

Из этих направлений первоочередным является решение задач формализации методов упорядочения рабочих операций, входящих в состав организационно-технологических модулей простых технологических процессов производства строительно-монтажных работ. В результате оказывается возможным получить для каждого организационно-технологического модуля нормы затрат труда и/или машинного времени на производство единицы продукции, использовать эти нормы в разработке календарных планов производства работ, совершенствовать организацию работы трудовых и/или технических ресурсов и тем самым повышать производительность их труда. Естественным продолжением этого направления должна являться разработка автоматизированных систем формирования и поддержания в актуальном состоянии баз данных характеристик организационно-технологических модулей простых технологических процессов, необходимых для функционирования систем автоматизированного календарного планирования и оперативно-производственного управления возведением объектов.

Следует отметить, что применение в техническом нормировании формализованных методов упорядочения организационно-технологических модулей позволит повысить надёжность и эффективность оперативно-производственного планирования в организациях, использующих программы управления проектами (MS Project, Spider Project, Primavera и др.) и в особенности в тех из них, которые только приступают к их освоению.

До 1990 года в неавтоматизированном режиме решение задач по указанным выше двум направлениям во всесоюзном масштабе осуществлялось в системе специализированных организаций, включающей ОРГТЕХСТРОИ, нормативно-исследовательские лаборатории и станции, подразделения НИИ отраслевых строительных министерств и др. под общим научно-методическим руководством ВНИПИ труда в строительстве. Каждая на своём уровне эти организации разрабатывали, распространяли и обновляли общесоюзные (ЕНиР), ведомственные (ВНиР) и местные (МНиР, предназначенные для отдельных предприятий) нормы затрат труда и машинного времени на производство соответствующих видов работ.

С начала 90-х годов ЕНиР утратили силу обязательных нормативных документов и перестали разрабатываться и обновляться, тем самым технологические процессы, в которых используются новые материалы, конструкции, техника и технологии остались без единого нормативного обеспечения, и календарное планирование практически повсеместно ведётся на основе опыта и интуиции разработчиков.

В настоящей работе описан формализованный подход к формированию организационно-технологических модулей простых технологических процессов и определению их нормативно-технических характеристик, в первую очередь, норм затрат труда и/или машинного времени исполнителей простых технологических процессов (ресурсов-модулей) [5]. Применение этого подхода проиллюстрировано на примере устройства сварных соединений сборных железобетонных конструкций. Формализация методов упорядочения рабочих операций и определения нормативно-технических характеристик организационно-технологических модулей выбранного простого технологического процесса произведена на основе принципов экономии труда и времени, предложенных ещё в конце XIX в. Ф.У. Тейлором [7].

С помощью этих методов, используя современный уровень развития IT-технологий, оказывается возможным восстановить систему технического нормирования СМР в виде программных средств, доступных для использования в каждой строительной организации. Такая система позволит разрабатывать индивидуализированные для каждого ресурса-модуля нормы времени (или выработки), что даст возможность проводить мониторинг работы каждого ресурса-модуля, оценивать его производительность и разрабатывать рекомендации по повышению уровня организации их работы.

Следует заметить, что в современных научных публикациях, посвящённых календарному планированию строительных работ, авторами не найдено работ, касающихся формализации методов технического нормирования и использования в календарном планировании норм, детализированных до уровня простых технологических процессов и тем более до рабочих операций. В лучшем случае недостаточная степень детализации норм и связанные с этим отклонения фактических графиков производства работ от планируемых учитываются в календарном планировании путём применения вероятностных оценок временных характеристик работ, как это сделано в [8, 9 и др.].

Структурно-функциональное моделирование строительных процессов

Структурно-функциональное моделирование в применении к процессам возведения объектов [6] основывается на принципе разбиения традиционных [10, 11 и др.] организационно-технологических моделей возведения объектов на взаимосвязанные структурную и функциональную составляющие – модель пространственно-технологической структуры [5, 6] и функциональную модель процесса возведения объекта [6].

Модель пространственно-технологической структуры формируется из принятых за базовые простых технологических процессов, элементы которых, как введено в работе [5], состоят из ресурсов-модулей, фронтов-модулей и работ-модулей. Ресурс-модуль представляет собой минимальный трудовой и/или технический ресурс простого технологического процесса, который выполняет работу (работу-модуль) объемом, равным его сменной выработке, и занимает необходимое для выполнения этой работы рабочее пространство – фронт-модуль. Эти элементы составляют в своей совокупности организационно-технологический модуль простого технологического процесса [12]. Анализ организационно-технологического модуля производится на уровне рабочих операций. При этом используется структурно-функциональное моделирование, включающее разработку с помощью формальных методов теории графов [13], экспертного оценивания [14, 15 и др.] и сетевого планирования и управления [13] модели пространственно-технологической структуры модуля и на ее основе функциональной модели организационно-технологического модуля простого технологического процесса, в которой используются методы сетевого планирования и теории расписаний [16 и др.].

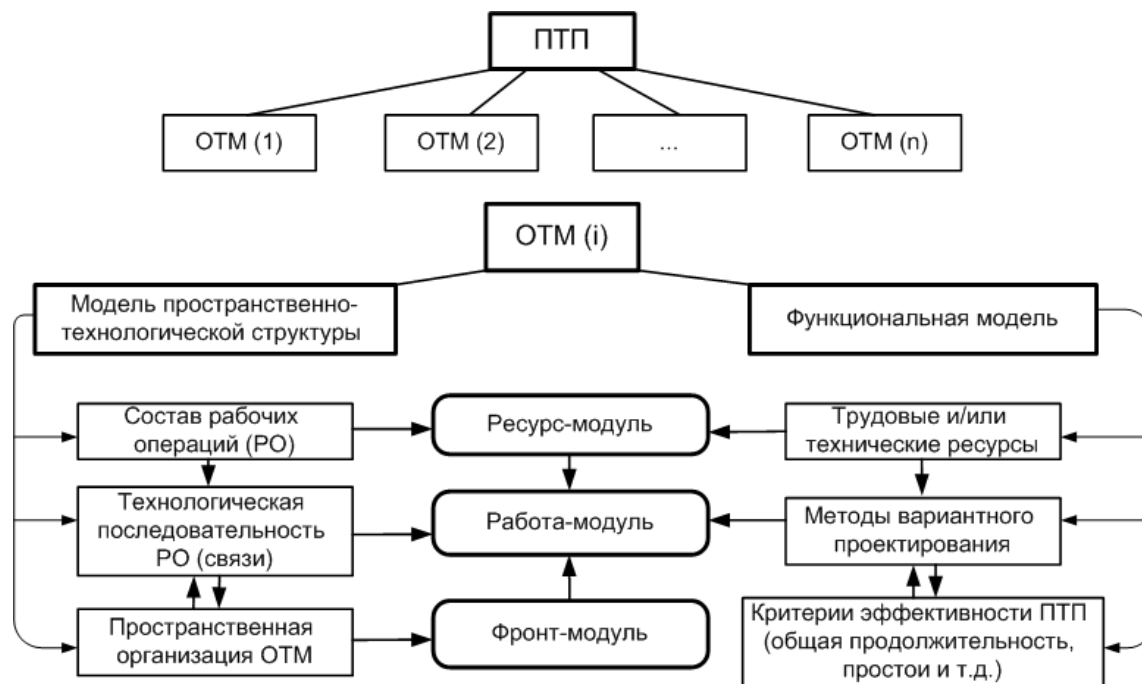


Рисунок 1. Организационно-технологический модуль простого технологического процесса

С помощью структурной модели организационно-технологического модуля определяются технологические взаимосвязи входящих в него рабочих операций и пространственные характеристики фронтов-модулей, а также выделяются группы рабочих операций, которые потенциально могут выполняться параллельно. В этом случае появляется возможность на каждую параллельно выполняемую рабочую операцию назначать своего исполнителя.

Решение задачи оптимального или субоптимального выбора количества исполнителей на выполнение всех рабочих операций организационно-технологического модуля должно производиться на функциональной модели модуля при составлении расписаний их работы. В этой же задаче определяется общая продолжительность выполнения работы-модуля на фронте-модуле. Эта продолжительность является нормой времени (затрат труда), затрачиваемого ресурсом-модулем на выполнение единицы объема работ в рассматриваемом простом технологическом процессе. В исследовании, проведенном на примере устройства сварных соединений сборных железобетонных конструкций, такой единицей измерения объемов работ является один стык, и норма затрат труда (времени) определяется на этот объем работ.

Таким образом, формализованный подход к формированию организационно-технологических модулей позволяет повысить степень организационной эффективности простых технологических процессов, характеризующихся следующими показателями качества: нормы затрат труда и машинного времени на единицу продукции, время простоев между операциями, количественный, профессиональный и квалификационный состав исполнителей, организация рабочего пространства и т.д.

В существующей инженерной практике технического нормирования [17] повышение организационной эффективности простых технологических процессов достигается в результате применения методов хронометражных наблюдений за работой исполнителей рабочих операций, проводится анализ этой работы, исключаются лишние и заменяются малоэффективные рабочие операции или отдельные рабочие приёмы в операциях. Недостатком такого подхода является то, что исходными данными хронометражных наблюдений служит работа исполнителей, эффективность которой изначально не оценивается и складывается в процессе производства работ. В случае внедрения инновационных разработок описанная методика превращается в недостаточно упорядоченную итерационную процедуру поиска средств для повышения эффективности структуры и работы изучаемых трудовых и технических ресурсов. Кроме того, оказывается затруднительным формализовать описанные методы хронометражных наблюдений для использования их в системах автоматизированной подготовки производства. Применение структурно-функционального моделирования в значительной степени устраняет эти недостатки.

Ниже приведен пример применения формализованных методов формирования организационно-технологического модуля простого технологического процесса устройства сварных соединений сборных железобетонных конструкций. Вначале формируется модель пространственно-технологической структуры организационно-технологического модуля.

Формирование модели пространственно-технологической структуры

Исходными данными для исследования послужили взятые из [18] следующие характеристики устройства сварных соединений (см. табл. 1): список рабочих операций сварки стыков, исполнители, обозначение операций в списке. Кроме того, в таблице приведены переобозначения рабочих операций, отражающие их технологическую последовательность.

Как видно из таблицы 1, в состав изучаемого организационно-технологического модуля входит 24 рабочих операции. С помощью методов сетевого планирования [13 и др.] и экспертных оценок [14, 15 и др.] проведено технологическое и пространственное упорядочение этих операций. В результате сформирована модель пространственно-технологической структуры организационно-технологического модуля, представляющая собой сетевую модель вида «вершины-работы» [6]. Вершинами в ней являются рабочие операции, которые в таблице 1 обозначены соответствующими элементами последовательности $(a_i), i=1, \dots, 24$.

В исследовании отыскиваются технологическая и пространственная упорядоченности отдельно, а затем они объединяются в одном графе. При этом технологическая упорядоченность определяется с применением метода экспертных оценок, а упорядочение пространства производится путём разбиения общего пространства организационно-технологического модуля на подпространства с помощью отношения эквивалентности. Для сопоставления в явном виде исходной и найденной технологической последовательностей рабочих операций в таблице 1 введён столбец последовательности $(b_i), i=1, \dots, 24$, выявленной по результатам исследования.

Таблица 1. Перечень рабочих операций ОТМ ПТП устройства сварных соединений

Наименование рабочей операции	Исполнитель	Обозначение операции в исходном списке	Переобозначение* операции в ее технологической последовательности
Подготовка стыков к сварке	сварщик 4 кат.	a ₁	b ₆
отрезка чрезмерно длинных стержней	сварщик 4 кат.	a ₂	b ₇
заготовка вставок	сварщик 4 кат.	a ₃	b ₈
отгиб стержней для установления их соосности на участках соединения	сварщик 4 кат.	a ₄	b ₉
разделка концов стержней арматуры	Сварщик 4 кат.	a ₅	b ₁₀
установка и уплотнение съемных форм	сварщик 4 кат.	a ₆	b ₁₂
установка и прихватка скоб и накладок	сварщик 4 кат.	a ₇	b ₁₄
Подготовка оборудования и материалов к сварке	лаборант, электромеханик 3 кат.	a ₈	b ₄
испытание материалов	лаборант	a ₉	b ₁₃
проверка тех. исправности сварочного оборудования	электромеханик 3 кат.	a ₁₀	b ₁₁
заземление корпуса трансформатора	электромеханик 3 кат.	a ₁₁	b ₅
Сварка стыков арматуры	сварщик 4 кат.	a ₁₂	b ₁₇
Снятие съемных формующих приспособлений, их охлаждение и очистка от шлака	сварщик 4 кат.	a ₁₃	b ₁₉
Пооперационный контроль сварочного процесса	мастер	a ₁₄	b ₁₈
входной контроль материалов	мастер	a ₁₅	b ₁
проверка соответствия проекту расположения закладных деталей	мастер	a ₁₆	b ₂
проверка соответствия проекту поступающих электродов и других материалов	мастер	a ₁₇	b ₃
качество подготовки стыков к сварке	мастер	a ₁₈	b ₁₅
контроль технического состояния сварочного оборудования	электромеханик 3 кат.	a ₁₉	b ₁₆
Контроль качества законченных сварных стыков	лаборант, сварщик 4 кат., мастер	a ₂₀	b ₂₀
визуальный контроль	сварщик 4 кат.	a ₂₁	b ₂₁
контроль геометрических параметров сварных стыков	мастер	a ₂₂	b ₂₂
неразрушающие методы контроля	лаборант	a ₂₃	b ₂₃
вырезание ответственных соединений для механических испытаний	лаборант	a ₂₄	b ₂₄

Модель пространственно-технологической структуры разрабатывается поэтапно.

1. Создание матрицы технологической последовательности, в которую заносятся результаты экспертного оценивания последования-предшествования операций в парных сравнениях. На этой же матрице учитываются различного рода неопределенности (независимость, невозможность определения отношения «предшествования-последования» между двумя операциями и т.д.).
2. Построение соответствующего матрице графа, исключение составных операций.
3. Разбиение графа технологической последовательности на слои, нахождение и отсеивание путей, являющихся следствием свойства транзитивности.
4. Разбиение слоёв на подклассы пространственной эквивалентности рабочих операций.

Калюжнюк М.М., Калюжнюк А.В. Упорядочение рабочих операций простых технологических процессов в строительстве

5. Создание конечного графа путем объединения графов технологической и пространственной структур.

Задача технологического упорядочения операций в математической постановке формулируется следующим образом.

Построим граф $G=(A, U)$, где $A=\{a_i \mid i=1, \dots, 24\}$, $U = \{(a_i, a_j) \mid a_i \ll a_j\}$, где символ " \ll " обозначает отношение порядка в технологической последовательности операций, а именно $a_i \ll a_j$ тогда и только тогда, когда a_i предшествует a_j . Для построения воспользуемся представлением графа в виде матрицы, с помощью которой вводится отношение порядка.

Требуется найти последовательность (b_i) , являющуюся перестановкой последовательности (a_i) такую, что из того, что $b_i \ll b_j$ следует, что $i < j$.

Отношение порядка " \ll " определяется методом экспертных оценок, а именно методом парного сравнения каждого из элементов последовательности (a_i) со всеми остальными. Результаты сравнения заносятся в матрицу связей между элементами последовательности (a_i) (см. табл. 2).

Таблица 2. Матрица технологических связей между рабочими операциями организационно-технологического модуля

	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	a ₈	a ₉	a ₁₀	a ₁₁	a ₁₂	a ₁₃	a ₁₄	a ₁₅	a ₁₆	a ₁₇	a ₁₈	a ₁₉	a ₂₀	a ₂₁	a ₂₂	a ₂₃	a ₂₄
a ₁	0	*	*	*	*	*	*	#	#	#	#	1	1	#	0	?	0	1	1	1	1	1	1	1
a ₂	*	0	#	#	#	1	1	#	#	#	#	1	1	#	0	0	0	1	#	1	1	1	1	1
a ₃	*	#	0	#	#	1	1	#	#	#	#	1	1	#	0	#	0	1	1	1	1	1	1	1
a ₄	*	#	#	0	#	1	1	#	#	#	#	1	1	#	0	0	#	1	#	1	1	1	1	1
a ₅	*	#	#	#	0	1	1	#	#	#	#	1	1	#	0	0	#	1	1	1	1	1	1	1
a ₆	*	0	0	0	0	0	1	#	#	#	#	1	1	#	0	#	#	1	1	1	1	1	1	1
a ₇	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	#	0	0	0	#	#	1	1	1	1	1
a ₈	*	#	#	#	#	#	1	0	*	*	*	1	1	#	#	#	#	#	1	1	1	1	1	1
a ₉	#	#	#	#	#	#	1	*	0	0	0	1	1	1	*	#	0	#	1	1	1	1	1	1
a ₁₀	#	#	#	#	#	#	1	*	1	0	0	1	1	#	#	#	0	#	1	1	1	1	1	1
a ₁₁	#	#	#	#	#	#	1	*	1	1	0	1	1	#	#	#	#	#	1	1	1	1	1	1
a ₁₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	#	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
a ₁₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	#	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
a ₁₄	#	#	#	#	#	#	#	#	0	#	#	#	#	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
a ₁₅	1	1	1	1	1	1	1	#	*	#	#	1	1	1	0	*	*	1	#	1	1	1	1	1
a ₁₆	?	1	#	1	1	#	1	#	#	#	#	1	1	1	*	0	#	#	#	1	1	1	1	1
a ₁₇	1	1	1	#	#	#	1	#	1	1	#	1	1	1	*	#	0	#	1	1	1	1	1	1
a ₁₈	0	0	0	0	0	0	#	#	#	#	#	1	1	1	0	#	#	0	#	1	1	1	1	1
a ₁₉	0	#	0	#	0	0	#	0	0	0	0	1	1	1	#	#	0	#	0	1	1	1	1	1
a ₂₀	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	#	#	#	#
a ₂₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	#	0	#	#	#
a ₂₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	#	#	0	#	#
a ₂₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	#	#	#	0	#
a ₂₄	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	#	#	#	#	0

Обозначим элемент матрицы, находящийся на a_j -й строке и в a_i -м столбце, за a_{ij} .

В табл. 2 введены следующие обозначения элементов a_{ij} :

- 1, если $(a_i, a_j) \in U$, то есть $a_i \ll a_j$;
- 0, если $(a_j, a_i) \in U$ то есть $a_j \ll a_i$.

Кроме того, для описания неопределённости при экспертном оценивании введены также:

- #, если (a_i, a_j) не принадлежит U & (a_j, a_i) не принадлежит U ;
- *, если в (a_i, a_j) один из элементов является составной частью другого;
- ?, если взаимосвязь между простой и составной операцией двойка и не поддаётся определению.

Разобьём граф G на слои, такие что все элементы данного слоя не имеют предков в рассматриваемом и последующих слоях, элементы первого слоя не имеют предков, элементы последнего – потомков;

Для разбиения графа, представленного в виде матрицы (табл. 2), на слои предложен следующий алгоритм.

База алгоритма: найдём все строки a_i в матрице такие, что из того, что $i \neq j$ следует, что $a_{ij} \neq 0$ и поместим такие a_i в первый слой. Очевидно, такие a_i будут существовать, иначе в графе найдутся циклы и, следовательно, этот граф не может однозначно задавать отношение порядка.

Шаг алгоритма: допустим, мы знаем все элементы, находящиеся в слоях от 1 до k , найдём тогда элементы, принадлежащие слою $k+1$. Для этого следует найти строки a_i , такие, что из того, что $a_{ij} = 0$ & $i \neq j$ следует, что a_j содержится в слоях от 1 до k .

Алгоритм заканчивает свою работу при нахождении всех строк a_i , которые не содержат единиц.

В результате применения алгоритма получен граф, разбитый на 7 слоёв (см. рис. 2). Вследствие многочисленности связей между операциями и сложности их визуального восприятия каждый элемент выделен из слоя, и для него составлен список необходимых к выполнению предшествующих операций. Таким образом, в каждом слое выделены те операции, которые технологически независимы и потенциально могут выполняться параллельно.

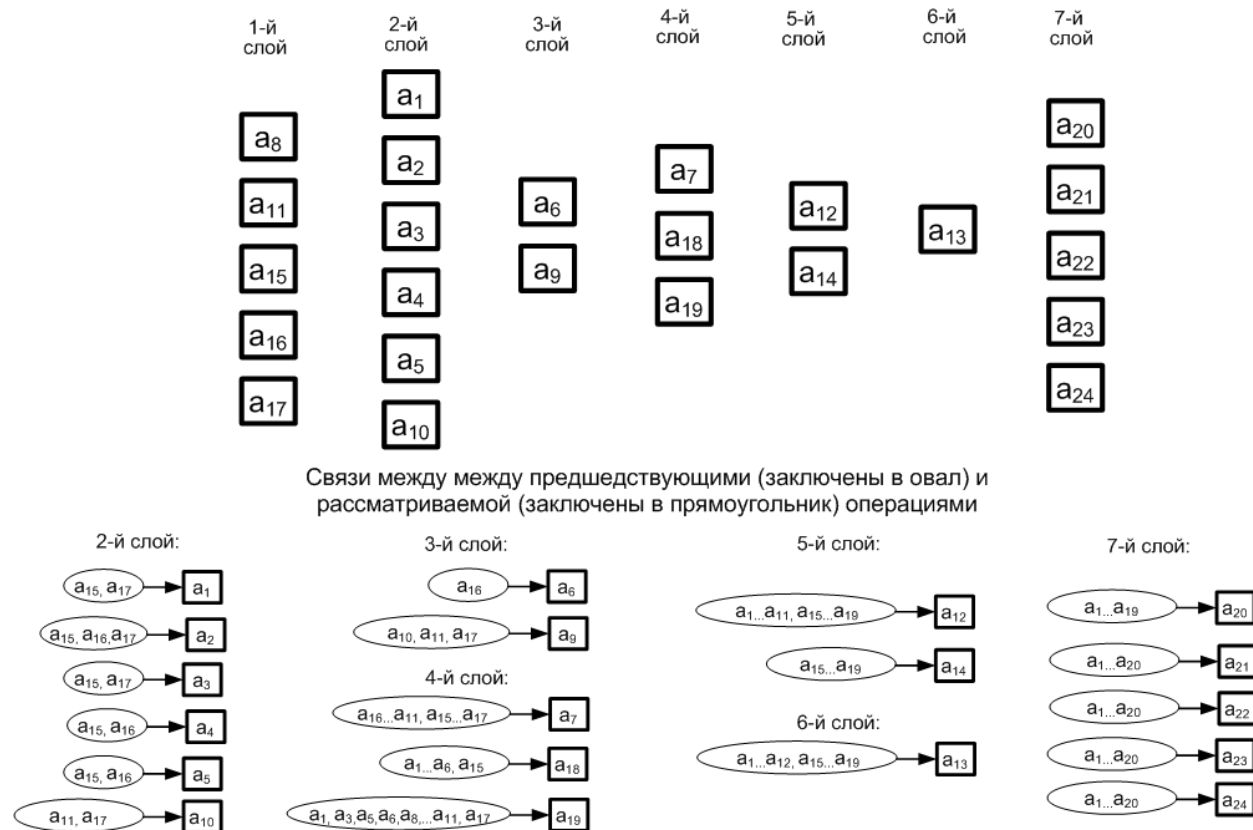


Рисунок 2. Граф технологической структуры организационно-технологического модуля простого технологического процесса устройства сварных соединений элементов сборных железобетонных конструкций. Построен по данным табл. 2. Обозначения:

a_1, \dots, a_{24} – рабочие операции ОТМ (см. табл. 1);

\rightarrow – технологические связи между операциями (см. табл. 2).

Изучение табл. 2 позволяет выявлять ошибки и неточности в первичных исходных. Так, в рассматриваемом примере (табл. 1) было установлено:

- операция a_{15} является составной, включающей в себя операции a_{16} , a_{17} и a_9 и может присутствовать в любом из первых трех слоев;
- операция a_{14} не является составной и может выполняться параллельно a_{12} ;
- циклы, появившиеся в результате экспертизы, устранены.

С учётом выявленных ошибок была составлена новая таблица (табл. 3), в которую были внесены соответствующие исправления, а операции перенумерованы с учётом их технологической последовательности. В этой таблице составные операции выделяются жирным шрифтом, входящие в них операции начинаются с прописной буквы, а простые операции, не являющиеся частью каких-либо других, начинаются с заглавной.

Таблица 3. Перечень рабочих операций организационно-технологического модуля, упорядоченный в их технологической последовательности с указанием рабочих мест для выполнения операций

Наименование рабочей операции	Исполнитель	Рабочее пространство операции*	Новое обозначение
Входной контроль	мастер		b ₁
проверка соответствия проекту расположения закладных деталей	мастер	РЗС	b ₂
проверка соответствия проекту поступающих электродов и других материалов	мастер	УПП	b ₃
Подготовка оборудования и материалов к сварке	лаборант, электромеханик 3 кат.		b ₄
заземление корпуса трансформатора	электромеханик 3 кат.	ППСО	b ₅
Подготовка стыков к сварке	сварщик 4 кат.		b ₆
отрезку чрезмерно длинных стержней	сварщик 4 кат.	УПП	b ₇
заготовку вставок	сварщик 4 кат.	УПП	b ₈
отгиб стержней для установления их соосности на участках соединения	сварщик 4 кат.	РЗС	b ₉
разделка концов стержней арматуры	Сварщик 4 кат.	РЗС	b ₁₀
проверка тех. исправности сварочного оборудования	электромеханик 3 кат.	ППСО	b ₁₁
установка и уплотнение съемных форм	сварщик 4 кат.	РЗС	b ₁₂
испытание материалов	лаборант	Лаборатория	b ₁₃
установка и прихватка скоб и накладок	сварщик 4 кат.	РЗС	b ₁₄
Качество подготовки стыков к сварке	мастер	РЗС	b ₁₅
Контроль технического состояния сварочного оборудования	Электромеханик 3 кат.	ППСО	b ₁₆
Сварка стыков арматуры	сварщик 4 кат.	РЗС	b ₁₇
Пооперационный контроль сварочного процесса	мастер	РЗС	b ₁₈
Снятие съемных формующих приспособлений, их охлаждение и очистка от шлака	сварщик 4 кат.	РЗС	b ₁₉
Контроль качества законченных сварных стыков	лаборант, сварщик 4 кат., мастер		b ₂₀
визуальный контроль	сварщик 4 кат.	РЗС	b ₂₁
контроль геометрических параметров сварных стыков	мастер	РЗС	b ₂₂
неразрушающие методы контроля	лаборант	РЗС	b ₂₃
вырезание ответственных соединений для механических испытаний	лаборант	РЗС+Лаборатория	b ₂₄

Примечание к таблице 3: введены следующие сокращения:

РЗС – рабочая зона сварки;

ППСО – перемещаемый пост сварочного оборудования;

УПП – участок приёмки и подготовки материалов.

В соответствии с выявленной последовательностью по данным табл. 3 был построен новый граф (рис. 3). В нём, кроме всего прочего, были исключены дуги, существование которых следует из свойства транзитивности, и вследствие этого являются избыточными. В этом графе все связи между элементами в явном виде представлены в виде дуг.

После построения графа технологической структуры ОТМ ПТП произведено пространственное упорядочение рабочих операций организационно-технологического модуля. Для этого общее пространство ОТМ разбито на основное и три обслуживающих подпространства (см. табл. 3). Обозначим эти подпространства следующими числами:

- участок приёмки и подготовки материалов (обслуживающее) – 1;
- рабочая зона сварки (основное) – 2;
- перемещаемый пост сварочного оборудования (обслуживающее) – 3;
- лаборатория (обслуживающее) – 4.

Тогда сопоставим каждому b_i соответствующее число k_i – номер основного или обслуживающего подпространства.

Далее было введено отношение пространственной эквивалентности “==” по правилу: из того, что $b_i, b_j \in (b_i) \& k_i = k_j$ следует, что $b_i == b_j$, то есть рабочие операции находятся в одном и том же подпространстве. Это отношение отражено на графе пространственной структуры (рис. 4). На этом рисунке выделены слои технологической упорядоченности графа и между рабочими операциями установлены связи пространственной эквивалентности.

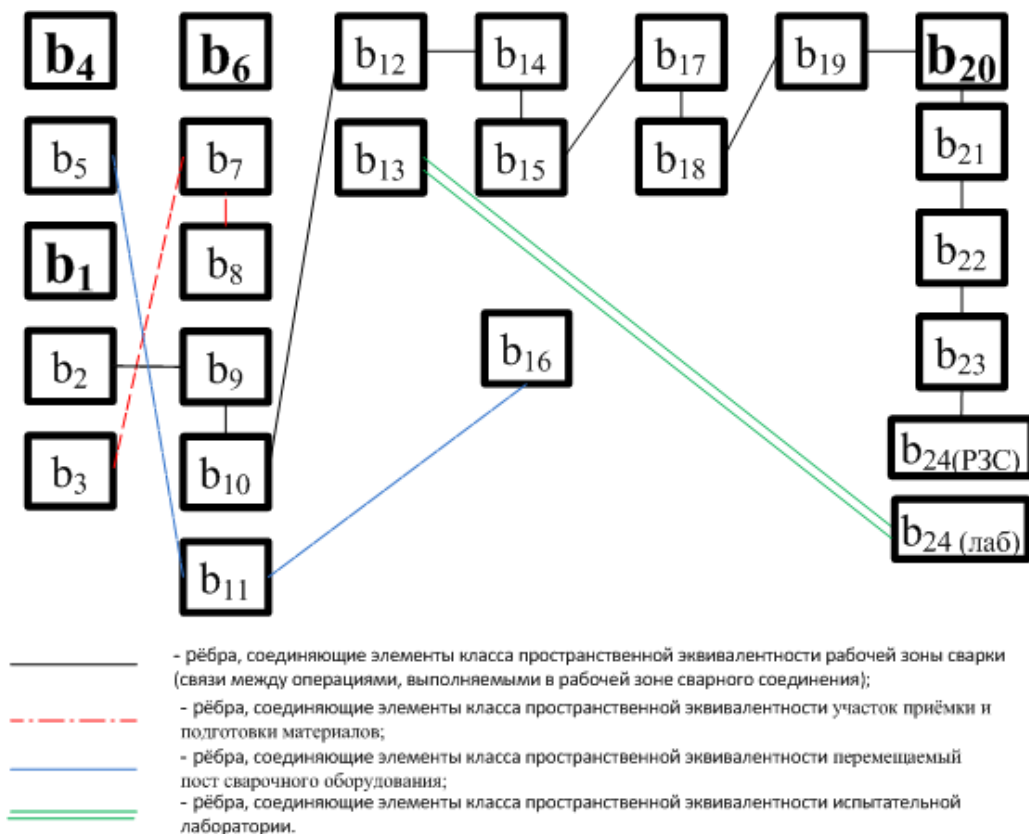


Рисунок 4. Граф пространственной структуры простого технологического процесса устройства сварных соединений элементов сборных железобетонных конструкций

Разработка функциональной модели организационно-технологического модуля

Как показано выше, модель пространственно-технологической структуры формируется путем объединения графов технологической и пространственной упорядоченностей и представляет собой объединенный граф, изображенный на рис. 6. В общем случае на этом объединенном графе отыскивается оптимальное или субоптимальное количество исполнителей соответствующих профессий и квалификаций, распределение операций между ними, а также расписаний их работы из условий минимального общего времени выполнения всех операций, входящих в организационно-технологический модуль. Постановка описанной задачи, выбор методов и ее решение представляет собой функциональную модель организационно-технологического модуля. В настоящем исследовании рассмотрен упрощенный вариант функциональной модели, в которой количество ресурсов и распределение операций между ними принято заданным (рис. 5) и включено в функциональную модель (рис. 6).

В функциональной модели для каждой рабочей операции введено значение времени ее выполнения t_{ijkl} , где i – индекс элемента последовательности (номер операции), $i=1, \dots, 24$; j – номер слоя, в котором находится операция, $j=1, \dots, 7$; k – номер основного или обслуживающего подпространства, $k=1, \dots, 4$; l – номер активного (трудового и/или технического) ресурса, $l=1, \dots, 4$.

Отметим, что везде, где это возможно, t_{ijkl} однозначно может быть заменено значением t_i , т.е. $t_{ijkl}=t_i$.

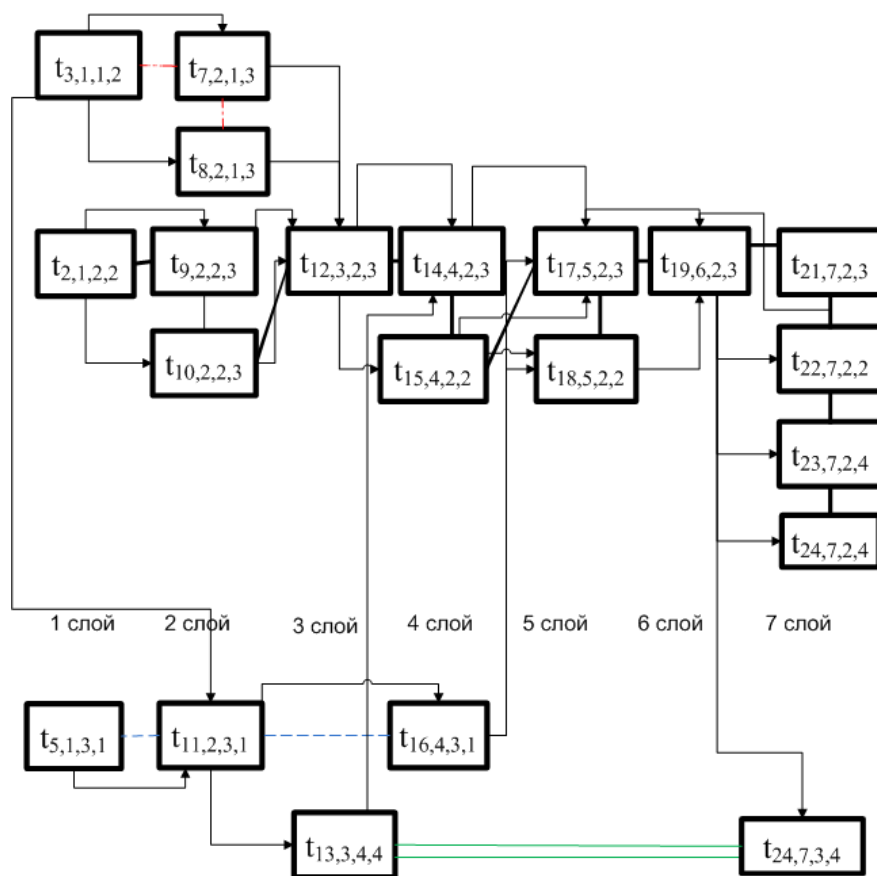


Рисунок 6. Граф организационно-технологического модуля простого технологического процесса

С помощью сформированной структурно-функциональной модели находится общая продолжительность операций основного подпространства (РЗС) организационно-технологического модуля по формуле:

$$T_{OTM} = \sum_{j=1}^7 f(t_{i_n, j, k, l_n}, f(t_{i_{n-1}, j, k, l_{n-1}}, \dots, f(t_{i_2, j, k, l_2}, t_{i_1, j, k, l_1}, \dots))),$$

где n для каждого j – количество элементов в слое, $k=2$,

$$f(t_{i_1,j,k,l_1}, t_{i_2,j,k,l_2}) = \begin{cases} t_{i_1,j,k,l_1} + t_{i_2,j,k,l_2}, l_1 = l_2; (\text{последовательная} \cdot \text{ работа} \cdot \text{ одного} \cdot \text{ ресурса}) \\ \max(t_{i_1,j,k,l_1}, t_{i_2,j,k,l_2}), l_1 \neq l_2; (\text{параллельная} \cdot \text{ работа} \cdot \text{ двух} \cdot \text{ ресурсов}) \end{cases}$$

Продолжительность работ в основном подпространстве является определяющей для остальных подпространств и для смежных процессов, поэтому рабочие операции в обслуживающих подпространствах могут начинаться с моментов, более ранних, чем в основном подпространстве. Определение начал и окончаний продолжительностей выполнения операций в соответствующих обслуживающих подпространствах определяются по формулам:

$$T_{\text{УПП окончание}} = t_2 + t_9 + t_{10}$$

$$T_{\text{УПП начало}} = T_{\text{УПП окончание}} - (t_3 + t_7 + t_8)$$

$$T_{\text{ППСО окончание}} = t_2 + t_9 + t_{10} + t_{12} + t_{14} + t_{15}$$

$$T_{\text{ППСО начало}} = T_{\text{ППСО начало}} - (t_{16} + t_{11} + \max(t_5, t_3))$$

$$T_{\text{Лаборатория окончание}} = t_2 + t_9 + t_{10} + t_{12} + t_{15}$$

$$T_{\text{Лаборатория начало}} \text{ варьируется от } (t_2 + t_9 + t_{10} + t_{12} + t_{15} - t_{13} - \max(t_3, t_5) + t_{11}) \text{ до } (t_2 + t_9 + t_{10} + t_{12} + t_{15} - t_{13})$$

Продолжительность работы без учёта простоев каждого ресурса-модуля

$$T_r = \sum_{ijkl:l=r} t_{ijkl},$$

где r – индекс исполнителя.

Простои каждого исполнителя определяются по формуле:

$$T_{r \text{ ок. факт.}} - T_{r \text{ нач. факт.}} - T_r.$$

В качестве примера ниже приведена оценка простоев электромеханика:

$$T_{\text{простоев}} = T_{\text{ППСО начало}} - (t_{16} + t_{11} + \max(t_5, t_3)) - T_{\text{ППСО начало}} - t_{16} - t_{11} - t_5 = \max(0, t_3 - t_5)$$

Таким образом, с помощью структурно-функциональной модели оказывается возможным определять основные показатели организационной эффективности простого технологического процесса (в данном случае сварки стыков сборных ЖБК).

Выводы

С помощью структурно-функциональных моделей и методов формализованного упорядочения рабочих операций простых технологических процессов строительного производства предлагается следующее.

1. Использовать методику формирования организационно-технологических модулей простого технологического процесса сварки стыков сборных железобетонных конструкций для разработки организационно-технологических модулей любых других технологических процессов. Дополнить методику оптимизационными методами распределения рабочих операций между исполнителями и составления вариантов оптимальных или субоптимальных расписаний их работы.

2. Применять получаемые показатели организационной эффективности простых технологических процессов (нормы затрат труда и машинного времени, состав рабочих операций, количество и равномерность загрузки исполнителей, их простои и т.д.) для анализа и совершенствования работы исполнителей, повышения производительности труда, поиска и внедрения инновационных разработок вплоть до автоматизации и роботизации процессов строительного производства. Рекомендуется проводить сплошной или выборочный мониторинг совершенствуемых процессов и вести учёт индивидуализированных норм времени (или выработки) ресурсов-модулей.

3. Использовать организационно-технологические модули простых технологических процессов для разработки баз данных для календарного планирования строительно-монтажных работ и в дальнейшем для автоматизации календарного планирования и оперативно-производственного управления.

4. Воссоздать систему технического нормирования строительных процессов на современной научной и технологической основе в виде программных продуктов, позволяющих каждой строительной организации разрабатывать свою внутриорганизационную систему норм затрат труда и машинного времени и позволяющую при этом создавать индивидуализированные нормы для каждого трудового и/или технического ресурса (ресурса-модуля). При разработке этих программных продуктов использовать рассмотренные в статье формализованные методы упорядочения организационно-технологических модулей простых технологических процессов – методы теории графов, экспертного оценивания, сетевого планирования и теории расписаний.

Литература

1. Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на долгосрочную перспективу (до 2030 г.). М., 2008.
2. Приоритетные направления развития науки, технологий и техники и перечень критических технологий Российской Федерации / Утверждены президентом Российской Федерации 21 мая 2006 г. Пр-843.
3. Калюжнюк М. М., Сандан Р. Н. О концептуальных основах инновационного развития строительной отрасли России: системно-синергетический подход // Вестник гражданских инженеров. 2010. №3(24). С. 108-117.
4. Aquilano N., Chase R., Jacobs R. Production and Operations Management / McGraw-Hill College. 1998. 612 p.
5. Калюжнюк М. М., Сандан Р. Н. Структурная классификация элементов строительных процессов // Вестник гражданских инженеров. 2008. №1(14). С. 46-52.
6. Калюжнюк М. М., Сандан Р. Н. Изучение адекватности модели пространственно-технологической структуры процесса возведения объекта конкретным условиям строительства // Вестник гражданских инженеров. 2011. №2(27). С. 105-115.
7. Taylor F. W. The principles of scientific management // Harper, 1913. 144 p.
8. Развитие теории и совершенствование методологии календарного планирования строительства в суровых условиях Крайнего Севера. Диссертация на соискание уч. степени докт. техн. наук / Климов, Сергей Эдуардович – 05.23.08 – Санкт-Петербург, 2005.
9. Chamulova V. Increasing time scheduling efficiency in the building process // Slovak journal of civil engineering. 2011. Vol. XIX, No. 2. Pp. 16–20.
10. Голуб Л. Г., Ляшенко Е. Н. АСУ строительного треста. М.: Стройиздат, 1976. 177 с.
11. Воропаев В. И. и др. Методические указания по декомпозиции объектов строительства на проектно-технологические модули. М.: ВНИИГим, 1988. 92 с.
12. Калюжнюк А. В. Определение показателей организационной эффективности простых технологических процессов на их структурно-функциональных моделях // Научно-исследовательская работа студентов СПбГАСУ: Сб. научных трудов студентов победителей конкурса грантов 2010-2011 г. Вып. 6/ СПб. гос. архит.-строит. ун-т. СПб., 2011. С. 32-38.
13. Kaufmann A., Desbazeille G. La Methode du chemin critique, Ed. Dunod, Paris, 1966. 188 p.
14. Литвак Б. Г. «Экспертная информация» методы получения и анализа. М.: Радио и связь, 1982. 184 с.
15. Балдин К. В., Быстров О. Ф., Соколов М. М. Эконометрика. М.: Юнити-Дана, 2004. 254 с.
16. Танаев В. С., Сотсков Ю. Н., Струевич В. А. Теория расписаний. Многостадийные системы. М.: Наука. Главная редакция физ.-мат. литературы, 1989. 328 с.
17. Балова Е. Ф., Бакерман Р. С. и др. Нормирование труда рабочих в строительстве / Под ред. Е.Ф. Баловой. М.: Стройиздат, 1985. 440 с.
18. Чахкиев И. М. Формирование нормативного уровня качества сварных соединений сборных железобетонных конструкций // Научно-исследовательская работа студентов СПбГАСУ: Сб. научных трудов студентов победителей конкурса грантов 2010-2011 г. Вып. 6/ СПб. гос. архит.-строит. ун-т. СПб., 2011. С. 26-32.

**Михаил Модестович Калюжнюк, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. раб.: +7(812)316-22-79, эл. почта: gamma5105@mail.ru