

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.].

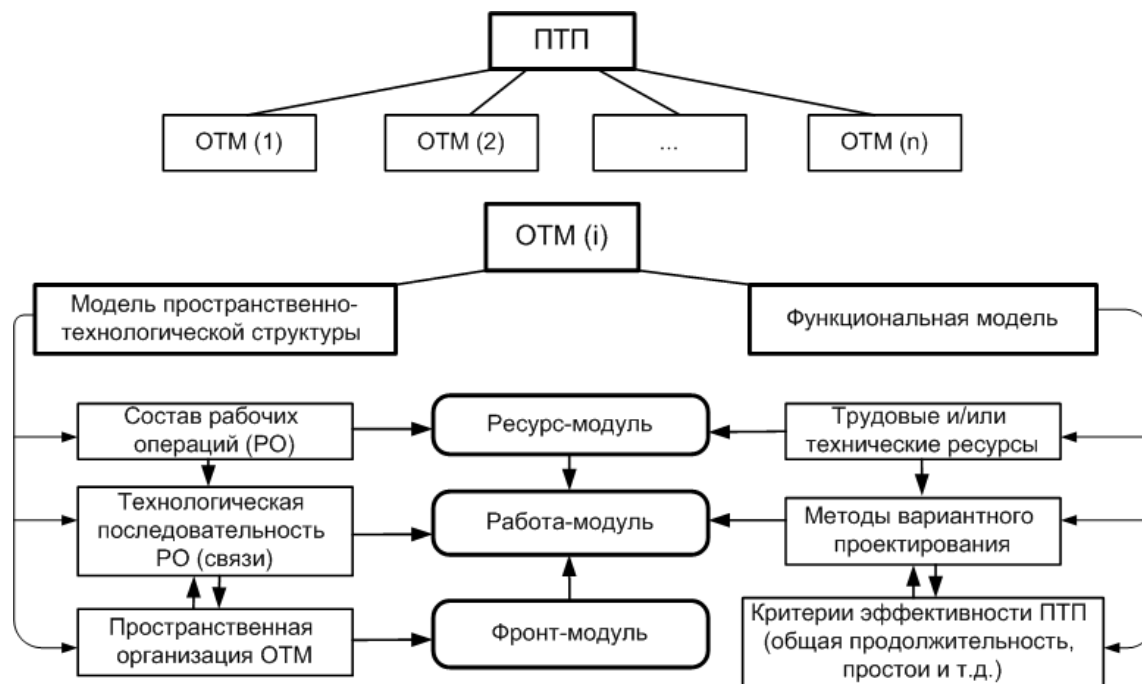


Рисунок 1. Организационно-технологический модуль простого технологического процесса

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 формирующих 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_i -й строке и в a_j -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.

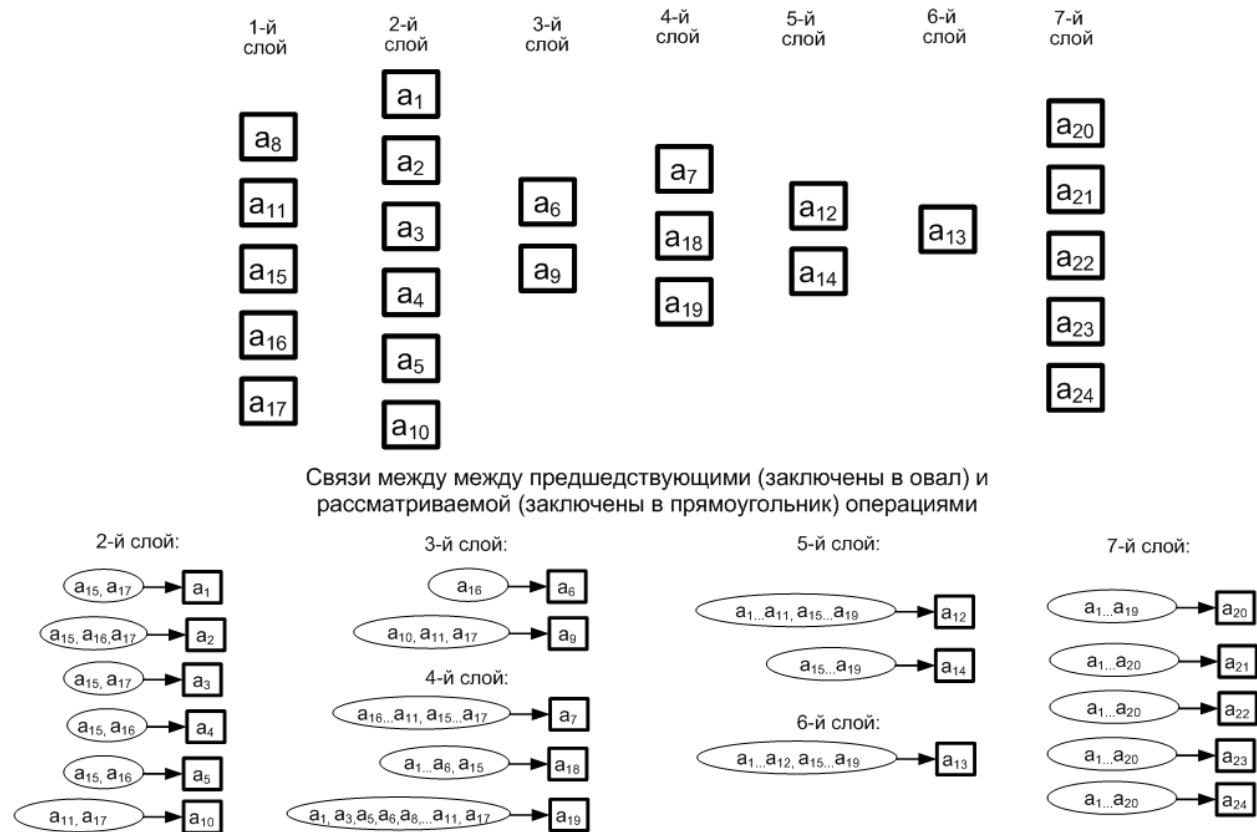


Рисунок 2. Граф технологической структуры организационно-технологического модуля простого технологического процесса устройства сварных соединений элементов сборных железобетонных конструкций. Построен по данным табл. 2. Обозначения:
 a_1, \dots, a_{24} – рабочие операции ОТМ (см. табл. 1);
 \rightarrow – 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 приёма 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.

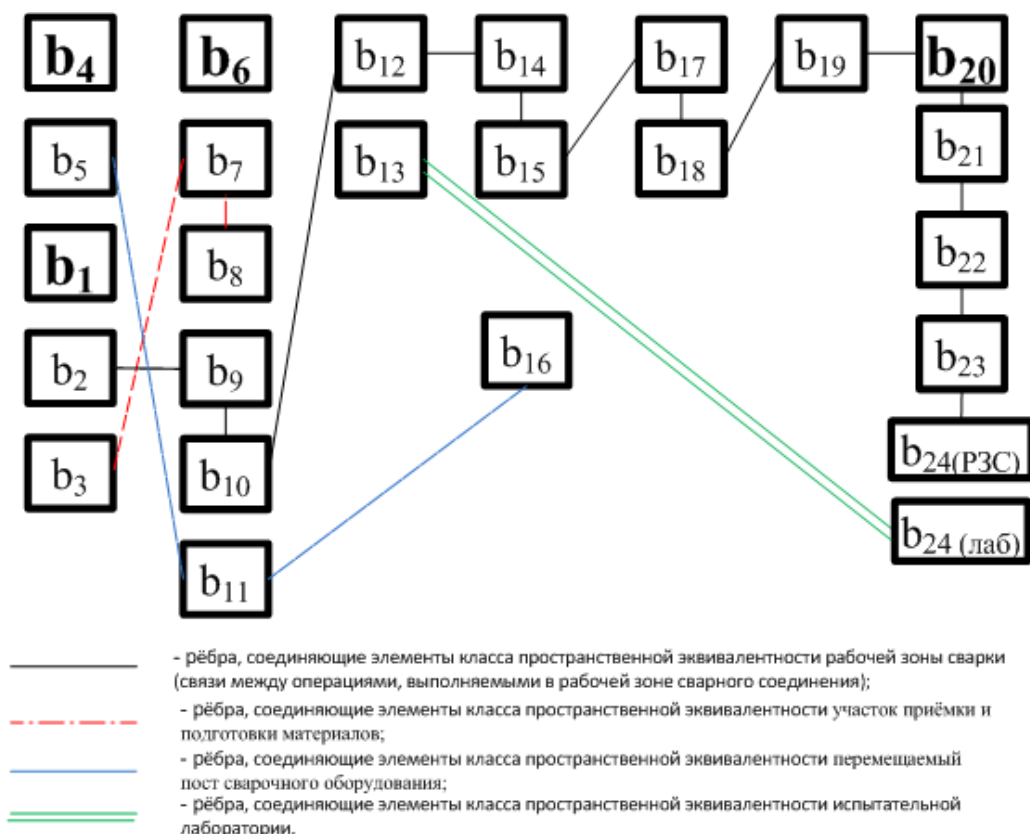


Рисунок 4. Граф пространственной структуры простого технологического процесса устройства сварных соединений элементов сборных железобетонных конструкций

Математическое описание пространственного упорядочения сводится к следующему: рассматривается граф $G = (B, F)$ (рис. 4), $B = \{b_i \mid i = 1 \dots 24\}$, $F = U K^c$ таких, что $c \in (b_i)$ (c называется индексом класса), $K^c = \{b_i \mid b_i \in (b_i) \ \& \ b_i = c\}$. Так как класс эквивалентности получается по любому элементу этого класса и классы взаимно не пересекаются, то можно заменить индекс класса на подпространство выполнения операций класса.

Пространственное отношение эквивалентности вводится для оценки возможности параллельного выполнения технологически независимых операций. Такая оценка из определения ОТМ представляет интерес только при определении пространства рабочей операции с точностью до фронта-модуля.

В настоящей работе список исполнителей рабочих операций, приведённый в табл. 1, принят заданным, то есть задача определения оптимального или субоптимального распределения операций между исполнителями не рассматривается. Такая задача должна решаться на функциональной модели организационно-технологического модуля. По введённому в табл. 1 списку исполнителей аналогично графу, представленному на рис. 4, строится граф ресурсной эквивалентности рабочих операций (рис. 5). Исполнителям присваиваются соответствующие номера:

- мастер – 1;
- электромеханик 3 кат. – 2;
- сварщик 4 кат. – 3;
- Лаборант – 4.

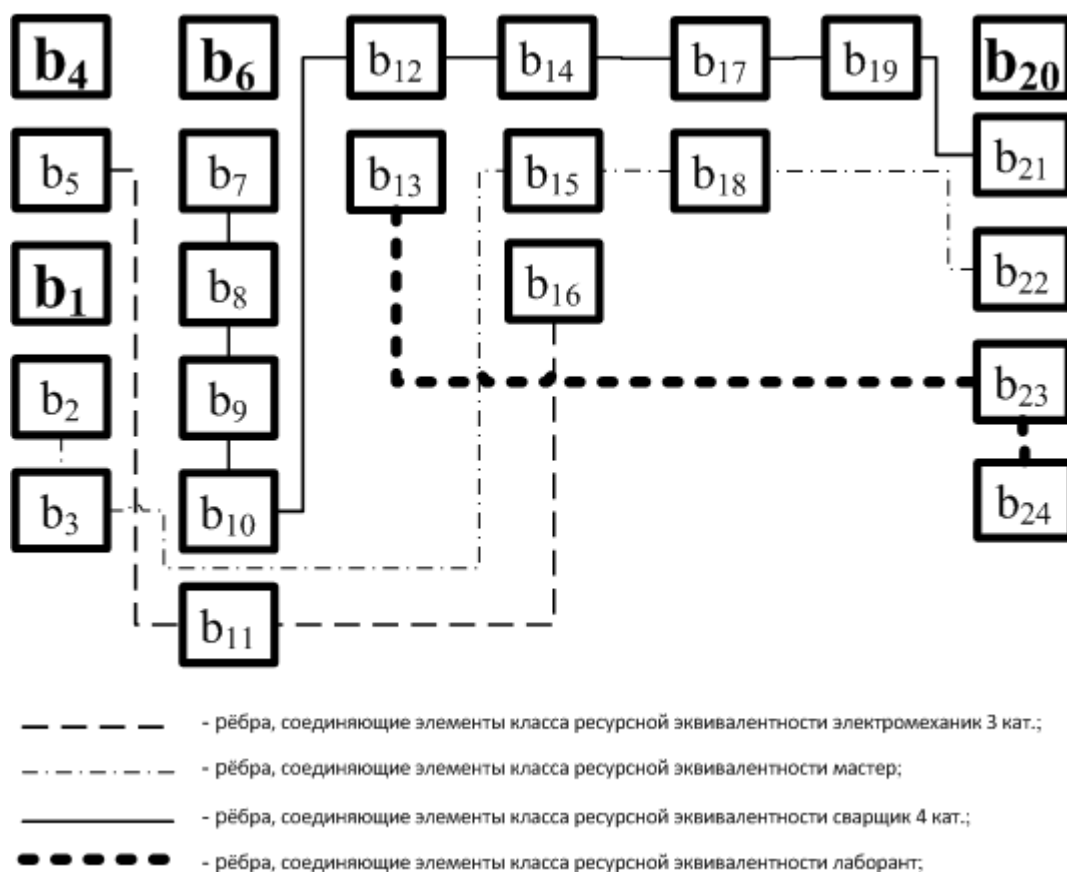


Рисунок 5. Структура распределения трудовых ресурсов простого технологического процесса устройства сварных соединений элементов сборных железобетонных конструкций

Граф ресурсной эквивалентности рабочих операций также составляется для оценки возможности параллельного выполнения операций.

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. $t_{ijkl}=t_i$.

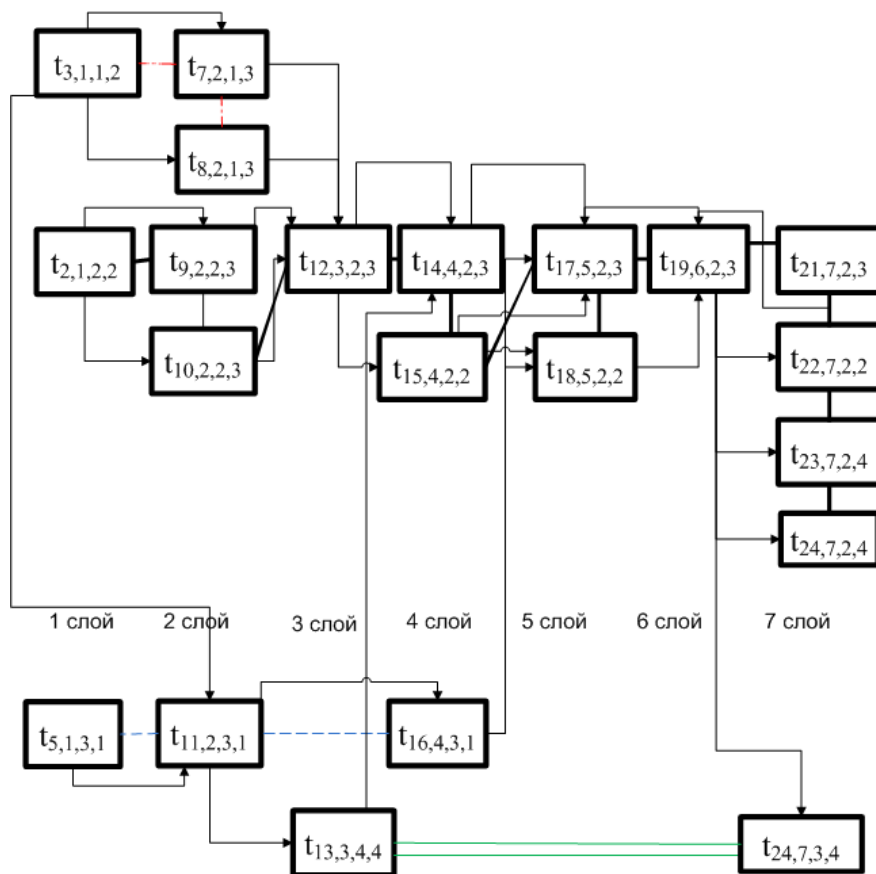


Рисунок 6. Граф организационно-технологического модуля простого технологического процесса

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:

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

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

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

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

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

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

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