УДК 658.512.6:658.527:69

© С. В. Бовтеев, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: SergeiBovteev@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-3-90-97

© S. V. Bovteev, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: SergeiBovteev@gmail.com

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПОТОЧНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТ МЕТОДОМ КРИТИЧЕСКОГО ПУТИ

CALCULATION OF THE PARAMETERS OF THE STREAMLINE WORK ORGANIZATION BY THE CRITICAL PATH METHOD

Для решения проблем оптимизации организации работ, уменьшения продолжительности строительства объектов и сокращения простоев ресурсов применяются модели поточной организации работ и сетевые модели, при этом в большинстве источников эти модели противопоставляются друг другу. Показана единая природа поточных методов и сетевого метода планирования, также известного как метод критического пути. Представлен алгоритм расчета потоков с непрерывным использованием ресурсов или с непрерывным освоением фронтов работ методом критического пути, который может быть интересен при моделировании сроков работ в среде современного программного обеспечения.

Ключевые слова: календарное планирование, поточная организация строительства, метод критического пути, метод с непрерывным использованием ресурсов, метод с непрерывным освоением фронтов, сетевое моделирование.

In order to solve the problems of work organization optimization, cutting the duration of project construction and reducing downtimes, the models of the streamline work organization and network models are used. The article shows the unified character of various streamline methods and the network planning method known as the critical path method. The author presents an algorithm for calculating the streams with continuous development of the operation field by the critical path method. This algorithm may be of interest for specialists engaged in scheduling of the terms of work using modern project management software programs.

Keywords: scheduling, streamline work organization of construction, critical path method, method with continuous use of resources, method with continuous development of operation field, network modeling.

Увеличение технической сложности строительных работ, повышение масштабов строительства и рост производственных связей требуют повышения внимания к организационно-технологической подготовке процесса возведения объектов, особенно к формированию календарных графиков выполнения работ как одной из наиболее существенных составляющих эффективности строительного производства.

Существенный рост объемов строительства, который произошел в нашей стране в период индустриализации 1930-х годов, вызвал значи-

тельные изменения в организации строительного производства: переход к подрядному способу выполнения работ, повышение уровня механизации, разработку и внедрение передовых на то время методов работ. Именно в те годы появились первые работы В. И. Батурина, М. С. Будникова, О. А. Вутке и многих других ученых и практиков, которые были направлены вначале на создание теории расчета ритмичных потоков, а затем полученные результаты были распространены и на случай неритмичных потоков. В результате к окончанию периода 1930-х годов

были разработаны достаточно эффективные именно для массового строительства методы точной организации работ [7].

Появление электронно-вычислительных машин в середине XX века стимулировало разработку нового метода расчета расписания работ. Американские специалисты Дж. Келли и М. Уолкер применили теорию графов для моделирования строительства преимущественно уникальных объектов. Этот метод, получивший название метода критического пути (*critical path method*), был впервые применен при реконструкции завода химического волокна в г. Луисвилле, штат Кентукки, после чего получил широкое распространение не только в США, но и во всем мире [16]. В нашей стране метод критического пути достаточно быстро был внедрен в практику строительства прежде всего масштабных и уникальных промышленных объектов, однако получил большую известность под названием «Метод сетевого планирования и управления (СПУ)» [8].

Непосредственно после появления и признания СПУ в нашей стране стали предприниматься попытки его увязки с методами поточной организации строительства. В. А. Афанасьев определил в качестве основного принципа поточной организации работ одновременное выполнение разнотипных работ при максимально возможном их сближении и обеспечении непрерывности использования ресурсов, либо непрерывности освоения частных фронтов (захваток), либо непрерывности выполнения критических работ [1]. Таким образом, именно непрерывность можно считать основным признаком поточности строительства, кроме того, это положение утвердило общность поточных и сетевых методов, предоставляло возможность разработать классификацию связей между работами и на ее основании предложить классификацию методов организации работ, включающую как уже известные ранее, так и предложенные разновидности потоков.

Согласно предложенной В. А. Афанасьевым классификации [1] к основным методам поточной организации работ относятся:

1. Метод с непрерывным использованием ресурсов (НИР), который обеспечивает нулевое растяжение ресурсных связей и непрерывность выполнения каждого вида работ.

2. Метод с непрерывным освоением частных фронтов (НОФР), который обеспечивает нулевое растяжение фронтальных связей и непрерывность работ на каждой отдельной захватке.

3. Метод с критическими работами, выявленными с учетом ресурсных и фронтальных связей (КР), который обеспечивает непрерывность выполнения критических работ, что гарантирует минимальную продолжительность потока по сравнению с другими методами. Метод с КР идентичен методу критического пути, предложенному Дж. Келли и М. Уолкером [16].

Классификация поточных методов включает и другие методы производства работ, формируемые за счет наложения дополнительных условий на сроки производства работ (например, за счет установки ранговых связей) либо сочетанием признаков, присущих различным основным методам организации строительства.

С 1990-х годов, после появления персональных компьютеров, в нашей стране применение для календарного планирования получили программные средства управления проектами (*Microsoft Project*, *Oracle Primavera P6*, *Spider Project* и др.), основанные исключительно на методе критического пути [6, 13].

В научной и учебной литературе [4, 5, 10–12, 14, 15] в настоящее время либо по-прежнему противопоставляют поточные методы организации строительства сетевым методам, либо считают метод критического пути частным случаем поточной организации работ, при этом отмечая, что методы НИР и НОФР, в отличие от метода КР, не имеют деления работ на критические и не критические.

Однако утверждению, что метод критического пути является одним из методов поточной организации работ, можно противопоставить противоположное утверждение: потоки НИР и НОФР являются частными случаями метода с КР, основанного на сетевом моделировании работ. Данный тезис не отменяет единой сущности планирования работ как за счет формирования потоков, так и за счет создания сетевых моделей: разбивку общего комплекса на отдельные работы и установку связей между работами.

Расчет методов поточной организации работ обычно выполняют аналитическим способом в табличной форме (в матрице) [1]. Как правило,

исходными данными является комплекс из N работ, при этом эти работы в заданной последовательности выполняются на каждой из M захваток. После формирования исходных данных на матрице рассчитываются несколько способов производства работ (НИР, НОФР, КР), после чего выбирается и принимается к исполнению оптимальный. Таким образом, расчет сроков работ и определение общей продолжительности проекта относятся к задаче теории расписания [9].

Метод критического пути подразумевает формирование сетевой модели, которая может обеспечить самое разнообразное взаимное расположение работ, однако в том случае, когда N работ последовательно выполняются на M захватках, параметры сетевой модели могут быть рассчитаны в матрице.

Примем следующие обозначения:

M — количество захваток на объекте строительства; $i = 1 \dots M$ — порядковый номер захватки в составе объекта; N — количество видов работ в составе комплекса; $j = 1 \dots N$ — порядковый номер вида работ в составе комплекса; t_{ij} — продолжительность выполнения j -й работы на i -й захватке; s_{ij} — плановый срок начала выполнения j -й работы на i -й захватке; f_{ij} — плановый срок завершения выполнения j -й работы на i -й захватке; es_{ij} — срок раннего начала выполнения j -й работы на i -й захватке; ef_{ij} — срок раннего завершения выполнения j -й работы на i -й захватке; ls_{ij} — срок позднего начала выполнения j -й работы на i -й захватке; lf_{ij} — срок позднего завершения выполнения j -й работы на i -й захватке; T — общая продолжительность комплекса работ.

Расписанием работ назовем массив информации, содержащий данные о продолжительностях и сроках выполнения всех работ на объекте.

Исходные данные для расчета отображаются в матрице, представляющей собой двумерный массив, где в столбцах представлены виды работ, а в строках — захватки (система ОФР, или «ордината — фронт работ»). В ячейках матрицы отображены продолжительности работ, выступающие в качестве исходных данных (рис. 1).

Отметим, что для достижения целей статьи достаточно сравнить метод КР с методом НИР, так как принципы расчета метода НОФР аналогичны НИР при условии перехода транспониро-

ОФР	1	...	j	...	N
I	t_{11}	...	t_{1j}	...	t_{1N}
...	...	...	...	...	...
i	t_{i1}	...	t_{ij}	...	t_{iN}
...	...	...	...	...	...
M	t_{M1}	...	t_{Mj}	...	t_{MN}

Рис. 1. Отображение исходных данных для расчета расписания работ на матрице в системе ОФР

вания матрицы в систему ОВР («ордината — вид работ»).

Расчет расписания работ методом НИР в соответствии с алгоритмами поточной организации работ производится следующим образом:

1. Определяются сроки развертывания каждого вида работ относительно предшествующего. Назовем периодом развертывания j -го вида работ относительно $(j-1)$ -го величину задержки начала j -го вида работ на первой захватке относительно срока завершения $(j-1)$ -го вида работ на первой захватке. Тогда период развертывания определяется по формуле

$$T_{j,j-1}^{\text{разв}} = \max \left\{ \begin{array}{c} t_{2(j-1)} - t_{1j} \\ (t_{2(j-1)} - t_{1j}) + (t_{3(j-1)} - t_{2j}) \\ \dots \\ (t_{2(j-1)} - t_{1j}) + (t_{3(j-1)} - t_{2j}) + \dots + \\ + (t_{M(j-1)} - t_{(M-1)j}) \end{array} \right\}. \quad (1)$$

2. Общая продолжительность комплекса работ определяется по формуле

$$T_{\text{НИР}} = \sum_{j=2}^N T_{j,j-1}^{\text{разв}} + \sum_{j=1}^{N-1} t_{1j} + \sum_{i=1}^M t_{iN}. \quad (2)$$

3. Срок начала работы первого вида на первой захватке s_{11} будет принят равным нулю, далее сроки выполнения работ первого вида будут определены исходя из обеспечения принципа непрерывности выполнения работ, т. е. $s_{i1} = f_{(i-1)1}$.

4. Срок начала работ последующих видов на первой захватке s_{1j} будет равен сроку завершения работы предшествующего вида на первой захватке и периода развертывания работ данного вида относительно предшествующего, т. е. $s_{1j} = f_{1(j-1)} + T_{j(j-1)}^{\text{разв}}$.

Далее сроки выполнения работ каждого вида будут определены исходя из обеспечения принципа непрерывности выполнения работ, т. е.

$s_{ij} = f_{(i-1)j}$. Срок завершения работы последнего вида на последней захватке будет равен общей продолжительности комплекса работ: $f_{MN} = T$.

Рассмотрим пример. В матрице (рис. 2) даны продолжительности работ (в днях) пяти видов (А, Б, В, Г, Д), которые должны быть последовательно выполнены на пяти захватках (I, II, III, IV, V).

Периоды развертывания согласно формуле (1) равны: вида работ Б относительно вида работ А — 2 дня, вида работ В относительно вида работ Б — 3 дня, вида работ Г относительно вида работ В — 10 дней и вида работ Д относительно вида работ Г — 10 дней. Общая продолжительность комплекса работ согласно формуле (2) равна:

$$T = (2 + 3 + 10 + 10) + (2 + 3 + 5 + 4) + (2 + 2 + 3 + 9 + 5) = 60 \text{ дней.}$$

Результаты расчета расписания работ методом НИР представлены в матрице (рис. 3). В левом верхнем углу ячейки, образованной пересечением i -й строки и j -го столбца матрицы, представлен срок начала работы j -го вида, выполняемой на i -й захватке s_{ij} . В правом верхнем углу ячейки — срок завершения работы j -го вида, выполняемой на i -й захватке f_{ij} .

Как утверждается в [1, 7, 8], при расчетах потока методом НИР все работы являются критическими. Согласно [2] под критическими работами понимают работы, при увеличении продолжительности или задержке срока начала которых на некоторую величину происходит увеличение общей продолжительности проекта на аналогичную величину. Работы, продолжительность которых можно увеличить на определенную величину (в пределах общего резерва времени работы) без влияния на общую продолжительность проекта, называются не критическими работами. Анализ матрицы (см. рис. 3) показывает, что работы АIII, AIV, AV, BIV, BV, BIV, BV и IV имеют

ОФР	А	Б	В	Г	Д
I	2	3	5	4	2
II	5	7	7	2	2
III	6	8	9	8	3
IV	4	5	4	7	9
V	1	2	3	4	5

Рис. 2. Матрица продолжительностей работ

ОФР	А	Б	В	Г	Д
I	0 2	4 7	10 15	25 29	39 41
II	2 7	7 14	15 22	29 31	41 43
III	7 13	14 22	22 31	31 39	43 46
IV	13 17	22 27	31 35	39 46	46 55
V	17 18	27 29	35 38	46 50	55 60

Рис. 3. Матрица расписания работ, рассчитанного методом НИР

резервы времени и являются не критическими. Например, работу AIV можно задержать на пять дней, что не вызовет увеличения всего комплекса работ при сохранении условия непрерывности выполнения всех видов работ. Продолжительности не критических работ на матрице (см. рис. 3) выделены жирным шрифтом.

Расчет метода КР в матричной форме состоит из трех этапов:

1. Определение ранних сроков каждой работы. Раннее начало каждой работы определяется зависимостью $es_{ij} = \max\{ef_{(i-1)j}; ef_{i(j-1)}\}$, раннее окончание: $ef_{ij} = es_{ij} + t_{ij}$. Общая продолжительность комплекса равна раннему окончанию работы последнего вида, выполняемой на последней захватке: $T = ef_{MN}$.

2. Определение поздних сроков каждой работы. Позднее окончание каждой работы определяется зависимостью $lf_{ij} = \min\{ls_{(i+1)j}; ls_{ij}\}$, позднее начало: $ls_{ij} = lf_{ij} - lt_{ij}$. При этом позднее окончание работы последнего вида, выполняемой на последней захватке, приравнивается к сроку окончания комплекса работ: $lf_{MN} = T$.

3. Определение общих резервов времени каждой работы $r_{ij} = ef_{ij} - es_{ij} = lf_{ij} - ls_{ij}$. Те работы, у которых резерв времени равен нулю ($r_{ij} = 0$), являются критическими работами.

Результаты расчета расписания работ согласно исходным данным, представленным в матрице продолжительностей работ (см. рис. 2), методом КР показаны в матрице (рис. 4). В левом верхнем углу ячейки, образованной пересечением i -й строки и j -го столбца матрицы, представлен срок раннего начала работы j -го

ОФР	А		Б		В		Г		Д	
I	0	2	2	5	5	10	10	14	14	16
	2		3		5		4		2	
	0	2	4	7	10	15	25	29	39	41
II	2	7	7	14	14	21	21	23	23	25
	5		7		7		2		2	
	2	7	7	14	15	22	29	31	41	43
III	7	13	14	22	22	31	31	39	39	42
	6		8		9		8		3	
	8	14	14	22	22	31	31	39	43	46
IV	13	17	22	27	31	35	39	46	46	55
	4		5		4		7		9	
	26	30	30	35	35	39	39	46	46	55
V	17	18	27	29	35	38	46	50	55	60
	1		2		3		4		5	
	45	46	46	48	48	51	51	55	55	60

Рис. 4. Матрица расписания работ, рассчитанного методом КР

вида es_{ij} , выполняемой на i -й захватке, в правом верхнем углу ячейки — срок раннего окончания работы j -го вида ef_{ij} , выполняемой на i -й захватке. В левом нижнем углу ячейки, образованной пересечением i -й строки и j -го столбца матрицы, представлен срок позднего начала работы j -го вида ls_{ij} , выполняемой на i -й захватке, в правом нижнем углу ячейки — срок позднего окончания работы j -го вида lf_{ij} , выполняемой на i -й захватке.

Продолжительности критических работ в матрице (см. рис. 4) выделены жирным шрифтом. Из матриц (см. рис. 3, 4) видно, что продолжительности потоков, рассчитанных методами НИР и КР, одинаковы и равны 60 дням. Однако если метод НИР предусматривает отсутствие растяжений ресурсных связей, то при расчете расписания работ методом КР суммарное растяжение ресурсных связей составило 47 дней при ранних сроках и 67 дней при поздних сроках производства работ.

Как известно [1], если выполнение работ, находящихся на матрице «выше» критического пути, запланировать в поздние сроки, а выполнение работ, находящихся «ниже» критического пути, запланировать в ранние сроки, то суммарное растяжение ресурсных связей будет минимальным, а общая продолжительность строительства не изменится.

Проиллюстрируем это утверждение на примере (рис. 5), в котором суммарное растяжение связей примем равным нулю, а принятые сроки работ полностью идентичны срокам работ, рассчитанным в соответствии с методом НИР. Однако такое возможно далеко не во всех случаях, так как продолжительность комплекса работ, определенная в соответствии с методом НИР, обычно выше продолжительности того же комплекса работ, но рассчитанного методом КР. Это объясняется за счет появления растяжений фронтальных связей между работами разных видов, лежащих на критическом пути.

В работе [2] было дано определение критической связи как конечно-начальной связи, соединяющей две критические работы. Обращается внимание, что любое растяжение критической связи приведет к увеличению общей продолжительности комплекса работ на аналогичную величину. Именно поэтому контролю за критическими связями следует уделять такое же внимание, как и критическим работам.

Требование непрерывности использования ресурсов может быть обеспечено установкой при расчете потока методом критического пути необходимых ограничений, т. е. заданными заранее рассчитанными величинами растяжений фронтальных критических связей. Для этого в настоящей статье предлагается следующий алгоритм, кратко представленный автором в [3]: для определения требуемой величины фрон-

ОФР	А		Б		В		Г		Д	
I	0	2	4	7	10	15	25	29	39	41
	2		3		5		4		2	
II	2	7	7	14	15	22	29	31	41	43
	5		7		7		2		2	
III	7	13	14	22	22	31	31	39	43	46
	6		8		9		8		3	
IV	13	17	22	27	31	35	39	46	46	55
	4		5		4		7		9	
V	17	18	27	29	35	38	46	50	55	60
	1		2		3		4		5	

Рис. 5. Матрица расписания работ при выполнении работ, расположенных выше критического пути, в поздние сроки, а работ, расположенных ниже критического пути, — в ранние сроки

тальной критической связи между работами j -го и $(j - 1)$ -го видов следует сложить две величины:

1) период развертывания j -го вида работ относительно $(j - 1)$ -го при условии, что критическая работа j -го вида (в которую входит рассматриваемая фронтальная критическая связь) считается первой;

2) период свертывания j -го вида работ относительно $(j - 1)$ -го при условии, что критическая работа j -го вида (в которую входит рассматриваемая фронтальная критическая связь) считается последней.

Рассмотрим фронтальную критическую связь между работами БП и ВП. Для обеспечения непрерывности использования ресурсов величина ее растяжения должна быть равна:

$$T_{\text{БП-ВП}}^{\text{раст}} = \max \left\{ \frac{5-9}{(5-9)+(2-4)} \right\} + \max \left\{ \frac{7-8}{(7-8)+(5-7)} \right\} = 0.$$

Изменим условие задачи. Пусть продолжительность работы АВ будет равной 12 дням, а продолжительность работы ДІ — 15 дням, продолжительности всех остальных работ оставим без изменения. Расчеты расписания работ методом КР представлены на рис. 6.

Для обеспечения непрерывности использования ресурсов некоторые фронтальные критические связи должны получить растяжение, а именно:

ОФР	А		Б		В		Г		Д	
I	0	2	2	5	5	10	10	14	14	29
	2		3		5		4		15	
	0	2	4	7	10	15	22	26	26	41
II	2	7	7	14	14	21	21	23	29	31
	5		7		7		2		2	
	2	7	7	14	15	22	29	31	41	43
III	7	13	14	22	22	31	31	39	39	42
	6		8		9		8		3	
	8	14	14	22	22	31	31	39	43	46
IV	13	17	22	27	31	35	39	46	46	55
	4		5		4		7		9	
	26	30	30	35	35	39	39	46	46	55
V	17	29	29	31	35	38	46	50	55	60
	12		2		3		4		5	
	34	46	46	48	48	51	51	55	55	60

Рис. 6. Матрица расписания работ (при измененных исходных данных), рассчитанного методом КР

$$T_{\text{АП-БП}}^{\text{раст}} = \max \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ 6-7 \\ (6-7)+(4-8) \\ (6-7)+(4-8)+(12-5) \end{array} \right\} + \max \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ 3-5 \end{array} \right\} = 2;$$

$$T_{\text{ГІВ-ДІВ}}^{\text{раст}} = \max \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ 4-9 \end{array} \right\} + \max \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ 3-7 \\ (3-7)+(2-8) \\ (3-7)+(2-8)+(15-2) \end{array} \right\} = 3.$$

Таким образом, продолжительность комплекса работ при условии непрерывности использования ресурсов составляет (рис. 7)

$$T_{\text{НИР}} = T_{\text{КР}} + \sum T^{\text{раст}} = 60 + (2 + 3) = 65 \text{ дней.}$$

Рассчитаем продолжительность потока с НИР по известной формуле (2):

$$T_{\text{НИР}} = (4 + 3 + 10 + 0) + (2 + 3 + 5 + 4) + (15 + 2 + 3 + 9 + 5) = 65 \text{ дней,}$$

что подтверждает сделанное выше предположение.

Предлагаемый алгоритм справедлив и для тех случаев, когда поток содержит несколько критических работ. В этом случае искусственно выделяется один любой критический путь из нескольких и расчетные операции выполняются только с ним. В результате расчета такого потока методом критического пути с добавлением изложенного алгоритма будет обеспечена непрерывность использования ресурсов.

ОФР	А		Б		В		Г		Д	
I	0	2	6	9	12	17	27	31	31	46
	2		3		5		4		15	
II	2	7	9	16	17	24	31	33	46	48
	5		7		7		2		2	
III	7	13	16	24	24	33	33	41	48	51
	6		8		9		8		3	
IV	13	17	24	29	33	37	41	48	51	60
	4		5		4		7		9	
V	17	29	29	31	37	40	48	52	60	65
	12		2		3		4		5	

Рис. 7. Матрица расписания работ (при измененных условиях), рассчитанного методом критического пути с условием обеспечения непрерывности использования ресурсов (фронтальные критические связи с растяжением выделены затемнением)

Как подчеркивалось ранее, все представленные утверждения полностью справедливы и для обеспечения непрерывности освоения фронтов работ, так как методы расчеты потоков с НИР и НОФР полностью аналогичны, различаются только системы матриц: ОФР и ОВР.

Представленный метод расчета предлагается также использовать в тех часто встречающихся на практике случаях, когда необходимо обеспечить непрерывность использования не всех, а только некоторых бригад (например, бригад, простой которых экономически невыгодны) при минимизации общей продолжительности строительства.

Библиографический список

1. Афанасьев В. А., Афанасьев А. В. Организация и планирование строительного производства. Поточная организация работ. СПб.: СПбГАСУ, 1999. 62 с.
2. Бовтеев С. В. Развитие теории и практики формирования и оптимизации параллельно-поточной организации работ: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: СПбГАСУ, 2000. 259 с.
3. Бовтеев С. В. Расчет потоков с непрерывным использованием ресурсов методом критического пути // Петербургская школа поточной организации строительства: I Всерос. науч.-практ. конф., посв. 95-летию со дня рождения проф. В. А. Афанасьева. 19–20 февр. 2018. СПб.: СПбГАСУ, 2018. С. 7–11.
4. Болотин С. А., Дадар А. Х., Котовская М. А. Модель пространственно-временной аналогии в оптимизации последовательности реконструируемых объектов // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 7. С. 51–57.
5. Болотин С. А., Мещанинов И. Ю. Методика оценки чувствительности схемы реализации комбинаторной оптимизации очередности освоения объектов // Вестник гражданских инженеров. 2009. № 2 (19). С. 20–24.
6. Болотин С. А., Нефедова В. К. Комбинаторная оптимизация в программах управления проектами // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2003. № 6. С. 47–51.
7. Будников М. С., Недавний П. И., Рыбальский В. И. Основы поточного строительства / под ред. М. С. Будникова. Киев: Госстройиздат УССР, 1961. 416 с.
8. Колчеданцев Л. М., Дроздов А. Д., Осипенкова И. Г., Ступакова О. Г. Петербургская школа поточной организации строительства // Петербургская школа поточной организации строительства: I Всерос. науч.-практ. конф., посв. 95-летию со дня рожде-

ния проф. В. А. Афанасьева. 19–20 февр. 2018. СПб.: СПбГАСУ, 2018. С. 3–7.

9. Конвей Р. В., Максвелл В. Л., Миллер Л. В. Теория расписаний / пер. с англ. В. А. Кокотушкина, Д. Г. Михалева; под ред. Г. П. Баширина. М.: Наука, 1975. 359 с.

10. Кремер О. Б., Подвальный С. Л. Программная реализация решения оптимизационных задач методом генетического алгоритма // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. 2012. № 3. С. 21–24.

11. Куклюгина Л. А., Куклюгин А. В., Харисов А. Р. Исследование существующих методов определения продолжительности строительства промышленных объектов // Известия КАГАСУ. 2012. № 1 (19). С. 134–139.

12. Морозова Т. Ф., Боковая Н. Н., Ся Цзямин. Организация поточной застройки кварталов объектами соцкультбыта // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. № 1 (6). С. 36–46.

13. Сергеев О. А. Календарное планирование строительства комплекса объектов с учетом особенностей программных средств // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 7 (22). С. 176–193.

14. Сиверикова А. И., Величкин В. З. Параллельно-поточный метод организации строительства // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 4 (31). С. 135–162.

15. Kalugin Yu. B. Universal method for calculation of reliable completion times // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 7 (67). С. 70–80.

16. Kelley J. E., Walker M. R. Critical-path planning and scheduling: a summary. N.Y.: Mauchly associates, 1960. 40 p.

References

1. Afanasyev V. A., Afanasyev A. V. *Organizatsiya i planirovanie stroitel'nogo proizvodstva. Potochnaya organizatsiya rabot*. [Organization and planning of construction production. Streamline organization of works]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 1999, 62 p.
2. Bovteev S. V. *Razvitie teorii i praktiki formirovaniya i optimizatsii parallel'no-potochnoy organizatsii rabot*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of theory and practice of formation and optimization of parallel-stream organization of work. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2000, 259 p.
3. Bovteev S. V. *Raschet potokov s nepreryvnym ispol'zovaniem resursov metodom kriticheskogo puti* [Calculation of streams with continuous use of resources by the critical path method]. *Trudy IV Vseros. nauch.-prakt. konf., posv. 95-letiyu so dnya rozhdeniya Prof. V. A. Afanas'eva*. 19–20 fevr. 2018 «*Peterburgskaya shkola potochnoy organizatsii stroitel'stva*» [Proc. of the IV All-

Russia sci.-pract. conf. devoted to the 95-th. anniversary since the birth of Professor V. A. Afanasyev, February 19–20, 2018 “St. Petersburg school of the streamline organization of construction”]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2018, pp. 7–11.

4. Bolotin S. A., Dadar A. Kh., Kotovskaya M. A. *Model' prostranstvenno-vremennoy analogii v optimizatsii posledovatel'nosti rekonstruiemykh ob'ektov* [Model of spatial-time analogy in optimization of the sequence of the reconstructed objects]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Engineering-construction journal*, 2013, no. 7, pp. 51–57.

5. Bolotin S. A., Meshchaninov I. Yu. *Metodika otsenki chuvstvitel'nosti skhemy realizatsii kombinatornoy optimizatsii ocherednosti osvoeniya ob'ektov* [Technique of estimating the sensitivity of the implementation scheme of optimizing the objects development sequence]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2009, no. 2 (19), pp. 20–24.

6. Bolotin S. A., Nefedova V. K. *Kombinatornaya optimizatsiya v programmakh upravleniya proektami* [Combination optimization in the project management programs]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo – News of higher education organizations. Construction*, 2003, no. 6, pp. 47–51.

7. Budnikov M. S., Nedavnyy P. I., Rybal'skiy V. I. *Osnovy potochnogo stroitel'stva* [Basics of streamline construction]. Ed. by Budnikov M. S. Kiev, Gosstroyizdat USSR Publ., 1961, 416 p.

8. Kolchedantsev L. M., Drozdov A. D., Osipenkova I. G., Stupakova O. G. *Peterburgskaya shkola potochnoy organizatsii stroitel'stva* [Petersburg school of the line organization of construction]. *Trudy IVseros. nauch.-prakt. konf., posv. 95-letiyu so dnya rozhdeniya prof. V. A. Afanas'eva. 19–20 fevr. 2018 «Peterburgskaya shkola potochnoy organizatsii stroitel'stva»* [Proc. of the I-st All-Russia sci.-pract. conf. devoted to the 95-th. anniversary since the birth of Professor V. A. Afanasyev, February 19–20, 2018 “St. Petersburg school of the streamline organization of construction”]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2018, pp. 3–7.

9. Konvey R. V., Maksvell V. L., Miller L. V. *Teoriya raspisaniy* [The theory of schedules]. Transl. from English

by Kokotushkin V. A., Mikhalev D. G.; ed. by Bashirin G. P. Moscow, Nauka Publ., 1975, 359 p.

10. Kremer O. B., Podval'nyy S. L. *Programmnyaya realizatsiya resheniya optimizatsionnykh zadach metodom geneticheskogo algoritma* [Program implementation of the solution of optimization tasks by the genetic algorithm method]. *Vestnik Voronezhskogo gos.tekhn. un-ta – Bulletin of Voronezh state technical university*, 2012, no. 3, pp. 21–24.

11. Kuklyugina L. A., Kuklyugin A. V., Kharisov A. R. *Issledovanie sushchestvuyushchikh metodov opredeleniya prodolzhitel'nosti stroitel'stva promyshlennykh ob'ektov* [Study of the existing methods of determination of industrial facilities' construction duration]. *Izvestiya KAGASU – KAGASU News*, 2012, no. 1 (19), pp. 134–139.

12. Morozova T. F., Bokovaya N. N., Sya Tszyamin. *Organizatsiya potochnoy zastroyki kvartalov ob'ektami sotskul'tbyta* [Organization of streamline building of quarters with social and cultural objects]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy – Construction of unique buildings and structures*, 2013, no. 1 (6), pp. 36–46.

13. Sergeenkova O. A. *Kalendarnoe planirovanie stroitel'stva kompleksa ob'ektov s uchetom osobennostey programmnykh sredstv* [Scheduling of construction of the complex of objects with due account of software program features]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy – Construction of unique buildings and structures*, 2014, no. 7 (22), pp. 176–193.

14. Siverikova A. I., Velichkin V. Z. *Parallel'no-potochnyy metod organizatsii stroitel'stva* [Parallel and streamline method of construction organization]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy – Construction of unique buildings and structures*, 2015, no. 4 (31), pp. 135–162.

15. Kalugin Yu. B. Universal method for calculation of reliable completion times. *Engineering-Construction Journal*, 2016, no. 7 (67), pp. 70–80.

16. Kelley J. E., Walker M. R. *Critical-path planning and scheduling: a summary*. N. Y., Mauchly Associates, 1960, 40 p.