

DOI: <https://doi.org/10.18454/mca.2022.27.4>

## ПРИМЕНЕНИЕ ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКИХ И СТОХАСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ВОЗВЕДЕНИЯ БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ

Научная статья

Ушакова Е.А.\*

Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия

\* Корреспондирующий автор (miss.sunshine.lady777[at]yandex.ru)

### Аннотация

В статье проведен анализ традиционного и нетрадиционного подходов к разработке организационно-технологических решений строительства на примере технологического цикла устройства буронабивных свай. Рассмотрены особенности формирования детерминистических и вероятностных (стохастических) математических (аналитических) моделей, которые предназначены для анализа качества организационно-технологических решений и показателей надежности строительного производства. Установлено, что модель строительного производства, разработанная в детерминистическом формате, не позволяет получить адекватной оценки организационно-технологической надежности строительства. Представлены результаты анализа организационно-технологической надежности устройства буронабивных свай с применением стохастической модели.

**Ключевые слова:** строительные процессы, организационно-технологические решения, детерминистические модели, стохастические модели, продолжительность строительства, вероятностная оценка.

## APPLICATION OF DETERMINISTIC AND STOCHASTIC MODELS FOR THE ANALYSIS OF THE ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL SEQUENCE OF THE CONSTRUCTION OF BORED PILES

Research article

Ushakova E.A.\*

Togliatti State University, Togliatti, Russia

\* Corresponding author (miss.sunshine.lady777[at]yandex.ru)

### Abstract

The article analyzes traditional and non-traditional approaches to the development of organizational and technological solutions for construction on the example of the technological cycle of the bored piles design. The specifics of the forming of deterministic and probabilistic (stochastic) mathematical (analytical) models, which are designed to analyze the quality of organizational and technological solutions and indicators of reliability of constructional operations, are analyzed. It is established that the model of constructional operation, developed in a deterministic format, does not allow to obtain an adequate evaluation of the organizational and technological reliability of construction. The results of the analysis of the organizational and technological reliability of the design of bored piles with a stochastic model are presented.

**Keywords:** construction processes, organizational and technological solutions, deterministic models, stochastic models, duration of construction, probabilistic assessment.

### Введение

В настоящее время аналитические (математические) модели и методы моделирования процессов и состояний относятся к числу наиболее распространенных и рациональных приемов научно-прикладных исследований и анализа особенностей функционирования сложных структурных (системных) образований, включая особенности состояний строительных объектов и условий формирования организационно-технологических решений строительного производства [1], [2].

Применение моделирования предметов, явлений и процессов (посредством математических или аналитических моделей) позволяет значительно сократить материальные (производственные) затраты и временные издержки, необходимые для определения расчетных параметров объекта исследований.

Разнообразие конструктивных решений (конструктивных и строительных систем строительных объектов), множественность вариантов реализации строительных процессов, особенности градостроительных, климатических и гидрогеологических условий объясняют распространение метода моделирования свойств и состояний строительного производства (простого или комплексного строительного процесса, отдельного цикла или этапа, а также строительства в целом) в практике разработки проектных (организационно-технологических) решений [3], [4].

Организационно-технологическая модель является условным образом строительного объекта (строительной продукции), отображающего уровень организационно-технологической надежности в контексте динамических изменений свойств и состояний строительного производства. Основной задачей разработки математической (организационно-технологической) модели является анализ и разработки условий для надежного и устойчивого функционирования строительного производства в конкретных условиях строительной площадки и ресурсных ограничений.

### Особенности детерминистических моделей организационно-технологических решений строительства

Традиционный метод разработки проектных (организационно-технологических) решений в отношении анализа особенностей строительных процессов, выполняемых при устройстве свайных фундаментов с применением буронабивных свай, предусматривает разработку соответствующей детерминистической (аналитической) модели в формате календарного или сетевого графика. Каждый из данных форматов представляет собой способ графической интерпретации параметров свойств и состояний строительного производства [5], [6].

К числу основных отличительных особенностей детерминистической модели можно отнести:

- детерминистическая (постоянная, неизменная) топология;
- детерминистические (постоянные, неизменные) величины временных оценок, характеризующих продолжительности выполнения строительных процессов (работ), включенных в топологию модели.

Формирование основных структурных элементов (топологии, временных оценок процессов) детерминистической модели организационно-технологической последовательности строительного производства (например, технологического цикла устройства буронабивных свай) осуществляется с обязательным использованием данных, указанных в нормативно-технических, технико-технологических, справочных, методических источниках.

Расчетные параметры детерминистической модели назначаются с использованием нормативных данных о затратах труда строительного персонала и машин по отношению к установленной единице измерения объема работы (строительного процесса). Установленные нормы затрат рабочего и машинного времени применяются при определении продолжительности (временной оценки) строительных работ (процессов), включенных в состав топологии соответствующей организационно-технологической модели [7], [8].

В отношении источников данных, необходимых для расчета временных оценок строительных процессов, включенных в состав детерминистической модели организационно-технологических решений, является допустимым использование, как государственных, так и ведомственных (отраслевых) норм, характеризующих нормы затрат времени рабочих и нормы времени эксплуатации строительных машин. Например, при разработке расчетных параметров детерминистической модели технологического устройства буронабивных свай (см. Рисунок 1) использованы данные типовой технологической карты [9].

Детерминистическая модель позволяет рассчитать продолжительности выполнения отдельных строительных процессов (работ) и общую продолжительность строительства (или критический путь строительства,  $t_{кр}$ ), но, без учета негативных последствий проявлений случайных факторов строительного производства (например, погодных воздействий, отказов строительной техники, ошибок человеческого фактора) [10].

Под случайными факторами подразумеваются негативные (отдельные или системные) проявления искусственной и естественной окружающей среды, сопровождающие строительное производство (Рисунок 1).

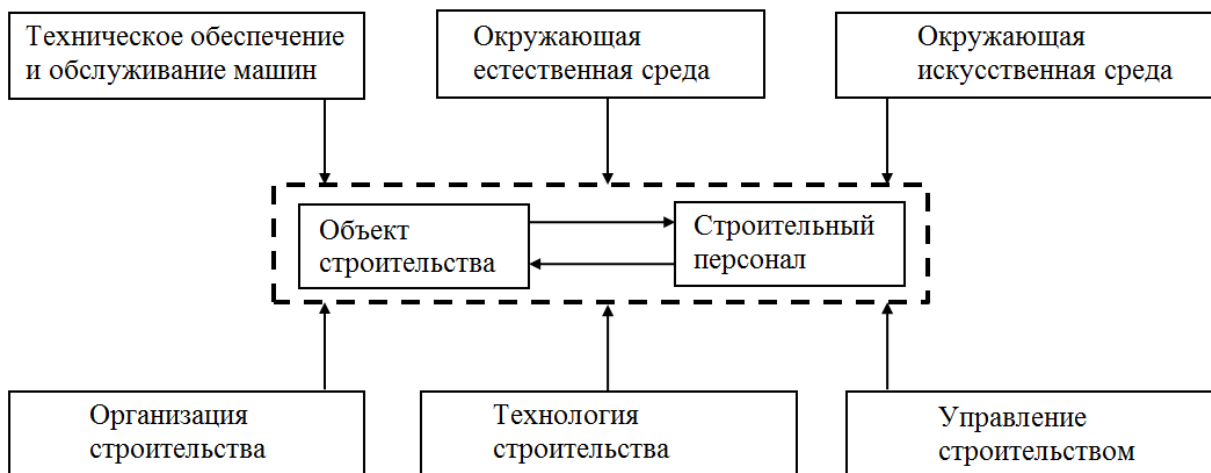


Рис. 1 – Состав и схема взаимодействия групп случайных (негативных) факторов влияния, сопровождающих строительное производство

Детерминистическая модель организационно-технологической последовательности выполнения строительных процессов позволяет определять (рассчитывать) продолжительность строительства (например, технологического цикла устройства буронабивных свай), но не позволяет осуществить оценку или прогноз последствий проявлений случайных негативных факторов, определять показатели устойчивости и организационно-технологической надежности строительства [11], [12].

Определение организационно-технологической надежности (например, в формате вероятности своевременного завершения строительного производства) достигается применением *вероятностных* или стохастических моделей строительства.

### Характеристика стохастических моделей организационно-технологических решений строительства

Влияние случайных (негативных) факторов на условия выполнения работ (строительных процессов), включенных в организационно-технологическую последовательность, способно привести к формированию отклонений от первоначальных проектных значений показателей организационно-технологических решений (продолжительности, стоимости, трудоемкости) строительства. Именно по этой причине становится целесообразным представление

(моделирование) посредством замены фиксированных, величин соответствующими стохастическими (случайными, вероятностными) распределениями значений, отражающих вероятность (как меру возможности) достижения установленной величины данных показателей [12], [13].

Применение вероятностных (стохастических) моделей для анализа организационно-технологических решений является логичным способом учета возможностей и особенностей влияния случайных факторов на функционирование, состояние и результаты (показатели) строительного производства.

Одной из наиболее значимых практических задач, решаемых с помощью вероятностной модели, становится определение показателей организационно-технологической надежности строительства, например, в формате вероятности своевременного завершения строительного производства (отдельного строительного процесса, цикла, этапа или строительства в целом). Вероятностная модель организационно-технологических решений позволяет осуществить системный анализ условий, опасностей и рисков отклонений от первоначально установленных показателей функционального качества строительной продукции.

Одним из возможных способов формирования вероятностной модели организационно-технологической последовательности строительного производства (например, календарного графика технологического цикла устройства буронабивных свай, см. Рисунок 1) является использование в качестве временной оценки работ (строительных процессов) вероятностных параметров продолжительности вида [13], [14]:

–математического ожидания  $M(i,j)$  временной оценки  $t(i,j)$  работы (как случайной характеристики продолжительности), представленной аналитической зависимостью:

$$M(i, j) = \frac{a_{ij} + 4 \cdot m_{ij} + b_{ij}}{6} \quad (1)$$

–дисперсией  $\sigma^2(i,j)$  временной оценки  $t(i,j)$  работы (как случайной характеристики продолжительности), представленной зависимостью:

$$\sigma^2(i, j) = \frac{(b_{ij} - a_{ij})^2}{36} \quad (2)$$

В рассматриваемые аналитические зависимости (1) и (2) включены параметры, отличающиеся случайным (вероятностным, возможным) характером:

$a_{ij}$  — минимальная или оптимистическая оценка продолжительности  $t(i,j)$  работы (строительного процесса);

$b_{ij}$  — максимальная или пессимистическая оценка продолжительности  $t(i,j)$  работы (строительного процесса);

$m_{ij}$  — наиболее вероятная (или мода) оценка продолжительности  $t(i,j)$  работы (строительного процесса).

Продолжительность  $t(i,j)$  работы (строительного процесса), которая включена в топологию вероятностной модели организационно-технологической последовательности строительного производства (в отличие от детерминистического представления), рассматривается из предположения о неопределенности или случайном характере возможных значений, определяемых параметрами вида  $a_{ij}$ ,  $b_{ij}$ ,  $m_{ij}$ .

В случаях отсутствия достоверной информации о расчетном параметре вида  $m_{ij}$  (например, при анализе инновационной технологии, по которой отсутствуют нормативные данные) расчетные зависимости (1) и (2) приводятся к виду:

$$M(i, j) = \frac{3 \times a_{ij} + 2 \times b_{ij}}{5} \quad (3)$$

$$\sigma^2(i, j) = \frac{(b_{ij} - a_{ij})^2}{25} \quad (4)$$

Расчетные зависимости (1)÷(4) характеризуют вероятностные значения продолжительности выполнения (временной оценки) для каждой работы (см. Рисунок 1), включенной в состав топологии вероятностной модели строительного производства. Количественные значения математического ожидания и дисперсии продолжительности строительного производства в целом определяются алгебраической суммой математических ожиданий и дисперсий работ, формирующих критический путь строительства ( $T_{кр}$ ) и представляются в виде зависимостей:

$$M(T_{кр}) = \sum_{(i,j) \in T_{кр}} M(i, j) \quad (5)$$

$$\sigma^2(T_{кр}) = \sum_{(i,j) \in T_{кр}} \sigma^2(i, j) \quad (6)$$

На Рисунках 2–4 представлены результаты анализа показателей организационно-технологической надежности

технологического цикла устройства буронабивных свай (см. Рисунок 1) с применением вероятностной модели (при детерминистической оценке критического пути  $t_{кр} = 60$  часов).

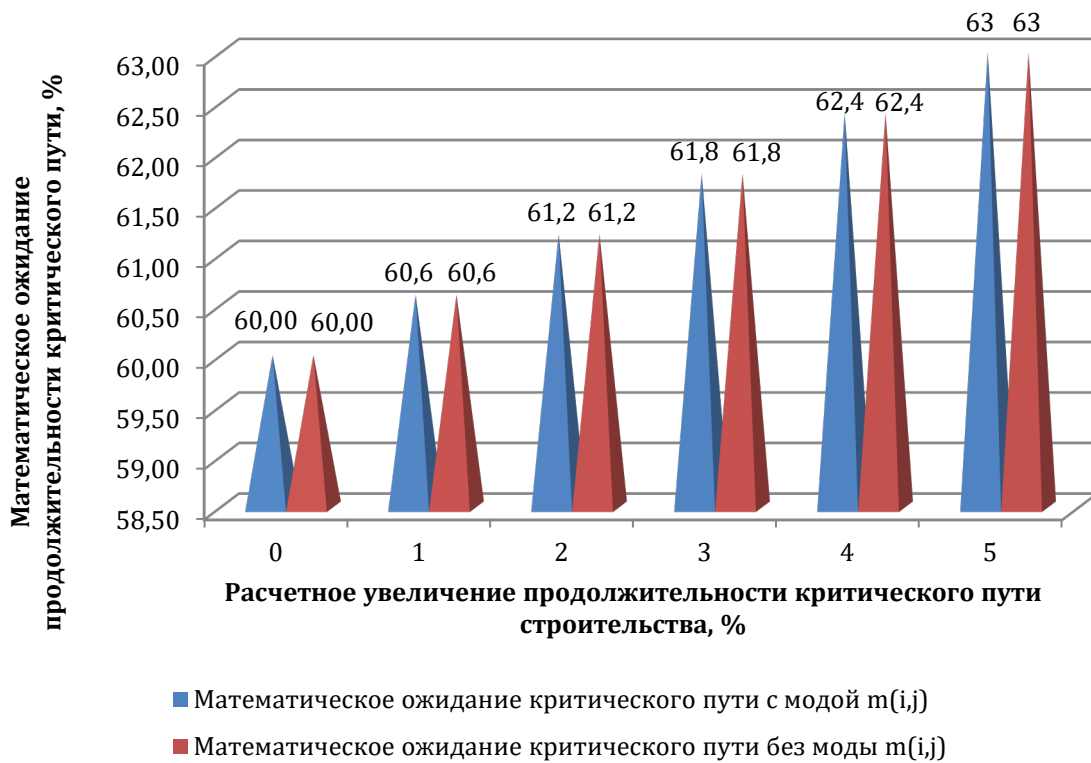


Рис. 2 – Показатели математического ожидания продолжительности критического пути строительного производства

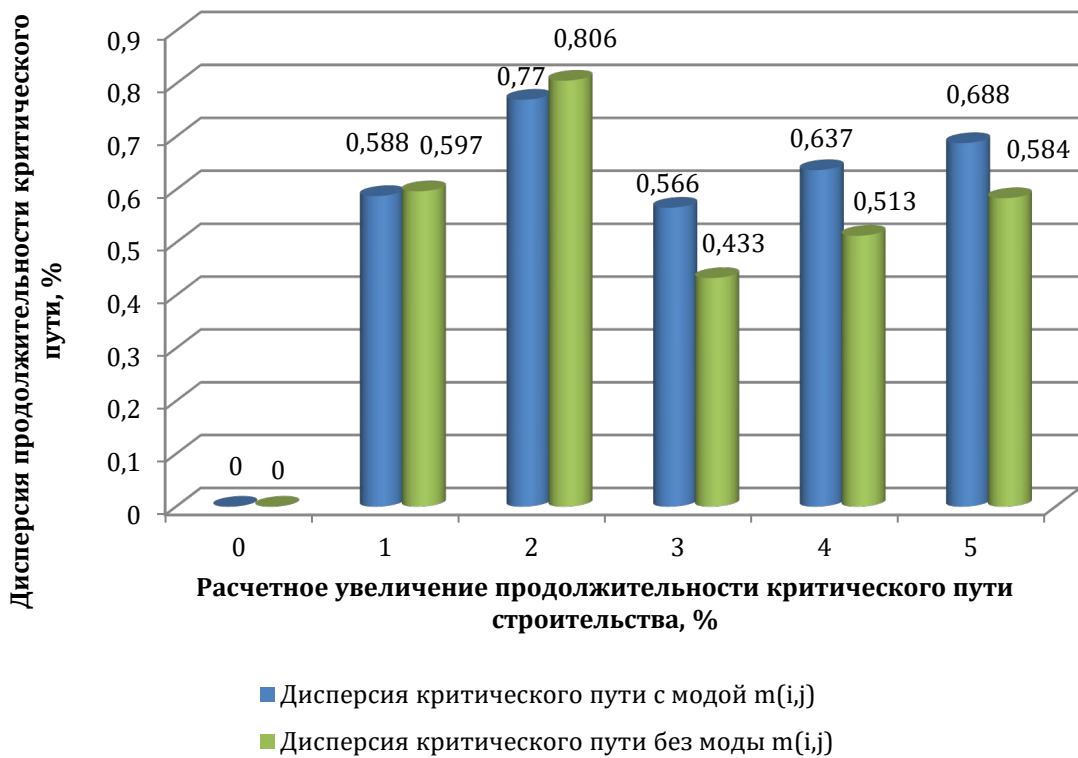


Рис. 3 – Показатели дисперсии продолжительности критического пути строительного производства

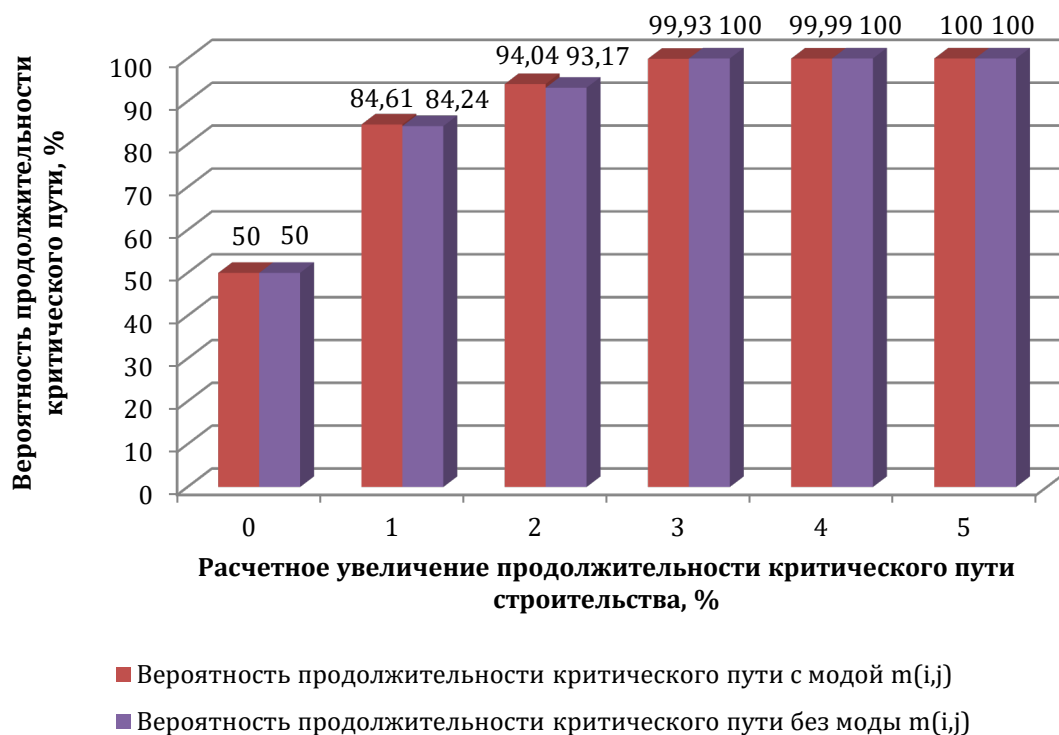


Рис. 4 – Показатели вероятности продолжительности критического пути строительного производства

### Выводы

Вне зависимости от варианта методического обоснования (с использованием или без использования расчетного параметра вида  $m_{ij}$ ) алгоритм анализа показателей организационно-технологической надежности строительного производства (вероятности своевременного завершения технологического цикла устройства свайных фундаментов с применением буронабивных свай) с применением соответствующей вероятностной модели является универсальным способом оценки качества проектных решений.

Каждый из рассмотренных методических приемов формирования стохастической модели (с использованием или без использования расчетного параметра вида  $m_{ij}$ ) является более адекватным, по сравнению с детерминистической моделью, инструментом анализа организационно-технологической последовательности устройства буронабивных свай.

### Conflict of Interest

None declared.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Список литературы / References

1. Лебедев В.М. Организационно-технологическое моделирование строительства: Монография. / В.М. Лебедев – М.: LAP LAMBERT Academic Publishing, – 2019. – 316 с.
2. Олейник П.П. Научные исследования: технология и организация строительства. / П.П. Олейник, В.Н. Кабанов, А.Н. Ларионов. – М.: МИСИ-МГСУ. ЭБС АСВ. – 2020. – 73 с.
3. Жаров Я.В. Принятие организационно-технологических решений в строительстве на основе технологии многомерного моделирования: дисс. ... канд. техн. наук: 05.22.02: защищена 24.12.14; утв. 18.01.15 / Я.В. Жаров – М., 2014. – 143 с.
4. Wilsek Caldart C. Construction site design planning using 4D BIM modeling / C. Wilsek Caldart, S. Scheer. // Gestão & Produção – 2022. – №29(00). – pp. 1–21.
5. Войтович С.А. Сетевое моделирование в строительстве. / С.А. Войтович – Омск: Издательство СибАДИ. 2007. – 36 с.
6. Эльшейх А.М. Информационное моделирование интегрированной автоматизации проектирования и календарного планирования в строительстве: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.12: защищена 26.11.15; утв. 20.12.15 / А.М. Эльшейх – М., 2015. – 139 с.
7. Государственные элементные сметные нормы ГЭСН-2020 – URL: <https://minstroyrf.gov.ru/trades/view.gesn-2020.php> (дата обращения: 13.07.2022).
8. Единые нормы и расценки на строительные, монтажные и ремонтно-строительные работы. – URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/11897/> (дата обращения: 13.07.2022).
9. Технологическая карта (ТК). Устройство буронабивных свай с применением буровой установки «КАТО». – М.: Министерство транспортного строительства. 1978. – 26 с.
10. Курченко Н.С. Выбор организационно-технологических решений для объектов строительства с учетом случайных факторов / Н.С. Курченко // Системные технологии. – 2018. – № 27. – С. 64–68.

11. Недавний О.И. Оценка организационно-технологической надежности строительства объектов / О.И. Недавний, С.В. Базилевич, С.М. Кузнецов // Системы. Методы. Технологии. – 2013. – № 2 (18). – С. 137–141.
12. Абрамов И.Л. Устойчивость производственной системы в вероятностных условиях строительного производства: дисс. ... докт. техн. наук: 05.02.22: защищена 03.12.21; утв. 14.01.22 / И.Л. Абрамов. – Иваново, 2021. – 313 с.
13. Castillo E. Expert systems and probabilistic network models. / E. Castillo, J.M. Gutierrez, A.S. Hadi. – New York: Springer Science & Business Media. 2012. – 605 p.
14. Голенко-Гинзбург Д.И. Стохастические сетевые модели планирования и управления разработками: Монография. / Д.И. Голенко-Гинзбург – Воронеж: Научная книга, 2010. – 284 с.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Lebedev V.M. Organizacionno-tehnologicheskoe modelirovanie stroitel'stva: Monografija [Organizational and technological modeling of construction: Monograph]. / V.M. Lebedev – M.: LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2019. – 316 p. [in Russian]
2. Olejnik P.P. Nauchnye issledovanija: tehnologija i organizacija stroitel'stva [Scientific research: technology and organization of construction]. / P.P. Olejnik, V.N. Kabanov, A.N. Larionov – M.: MISI-MGSU. JeBS ASV. – 2020. – 73 p. [in Russian]
3. Zharov Ja.V. Prinjatje organizacionno-tehnologicheskikh reshenij v stroitel'stve na osnove tehnologii mnogomernogo modelirovanija [Making organizational and technological decisions in construction based on multidimensional modeling technology]: dis. ... of PhD in Technic: 05.22.02: defense of the thesis 24.12.14: approved 18.01.15 / Ja.V. Zharov. – M., 2014. – 143 p. [in Russian]
4. Wilsek Caldart C. Construction site design planning using 4D BIM modeling / C. Wilsek Caldart, S. Scheer. // Gestão & Produção – 2022. – №29(00). – pp. 1–21.
5. Vojtovich S.A. Setevoe modelirovanie v stroitel'stve [Network modeling in construction]. / S.A. Vojtovich – Omsk: SibADI Publishing House. – 2007. – 36 p. [in Russian]
6. Jel'shejh A.M. Informacionnoe modelirovanie integrirovannoj avtomatizacii proektirovanija i kalendarnogo planirovanija v stroitel'stve [Information modeling of integrated design and scheduling automation in construction]: dis. ... of PhD in Technic: 05.13.12: defense of the thesis 26.11.15: approved 20.12.15 / A.M. Jel'shejh. – M., 2015. – 139 p. [in Russian]
7. Gosudarstvennye jelementnye smetnye normy GESN-2020 [State elemental cost estimates GESN-2020] – URL: <https://minstroyrf.gov.ru/trades/view.gesn-2020.php> (accessed: 13.07.2022). [in Russian]
8. Edinye normy i rascenki na stroitel'nye, montazhnye i remontno-stroitel'nye raboty [Uniform standards and rates for construction, installation and repair and construction works]. – URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/11897/> (accessed: 13.07.2022). [in Russian]
9. Tehnologicheskaja karta (TK). Ustrojstvo buronabivnyh svaj s primeneniem burovoj ustanovki «KATO» [Installation of bored piles using the KATO drilling rig]. – M.: Ministerstvo transportnogo stroitel'stva. – 1978. – 26 p. [in Russian]
10. Kurchenko N.S. Vybor organizacionno-tehnologicheskikh reshenij dlja ob'ektov stroitel'stva s uchetom sluchajnyh faktorov [Selection of organizational and technological solutions for construction facilities taking into account random factors] / N.S. Kurchenko // Sistemnye tehnologii [System technologies]. – 2018. – № 27. – pp. 64–68. [in Russian]
11. Nedavnij O.I. Ocenka organizacionno-tehnologicheskij nadezhnosti stroitel'stva ob'ektov [Assessment of organizational and technological reliability of construction of facilities] / O.I. Nedavnij, S.V. Bazilevich, S.M. Kuznecov // Sistemy. Metody. Tehnologii [Systems. Methods. Technologies]. – 2013. – № 2 (18). – pp. 137–141. [in Russian]
12. Abramov I.L. Ustojchivost' proizvodstvennoj sistemy v verojatnostnyh uslovijah stroitel'nogo proizvodstva [Stability of the production system in probabilistic conditions of construction production]: dis. ... of PhD in Technic: 05.02.22: defense of the thesis 03.12.21: approved 14.01.22 / I.L. Abramov. – Ivanovo, 2021. – 143 p. [in Russian]
13. Castillo E. Expert systems and probabilistic network models. / E. Castillo, J.M. Gutierrez, A.S. Hadi. – New York: Springer Science & Business Media. 2012. – 605 p.
14. Golenko-Ginzburg D.I. Stohasticheskie setevye modeli planirovanija i upravlenija razrabotkami: Monografija [tochastic network models of planning and development management: Monograph]. / D.I. Golenko-Ginzburg – Voronezh: Nauchnaja kniga, 2010. – 284 p. [in Russian]