

УДК: 658.5
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/74.22
EDN: UFPVPC



Комплексная имитационная модель исследования показателей качества работы проектной организации при проектировании транспортных сооружений

М.В. Петроченко

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Сложность и уникальность объектов транспортного строительства, надежность и безопасность их работы предъявляют высокие требования к качеству инвестиционно-строительных проектов. Несмотря на большое количество исследований в области научного обоснования процессов управления качеством проектирования транспортных сооружений, проблему разработки методологической и нормативно-технической базы оценки качества работы проектных групп и принимаемых проектных решений нельзя признать решенной. *Цель работы* заключается в разработке комплексной имитационной модели, позволяющей обосновать оптимальную организационно-технологическую схему разработки проекта, учитывающую неопределенность исходных данных и вероятностный характер информационного, ресурсного обеспечения процесса проектирования, а также экономическую неопределенность строительства и эксплуатации проектируемого транспортного сооружения. *Задачи исследования:* определить оптимальный численный состав проектной группы; сформировать требования к квалификации специалистов, входящих в группу; распределить функциональные обязанности между специалистами; разработать организационно-технологическую схему проектирования; оценить качество работы проектной группы.

Результаты. Предложен методологический подход к оценке качества работы проектной группы при реализации организационно-технологических схем проектирования транспортных сооружений.

Выводы. Предлагаемая комплексная имитационная модель позволяет исследовать влияние на качество проектных решений состава проектных групп; изучать влияние систем автоматизированного проектирования и инновационных технологий выполнения проектных работ на сроки и качество принимаемых решений; определять комплекс мероприятий по сокращению сроков проектирования и повышению качества проектов в транспортном строительстве; обосновать состав проектной группы с учетом эффективного и рационального распределения задач проектирования между специалистами в соответствии с их квалификацией и опытом работы.

Ключевые слова: имитационная модель, показатель качества, транспортное сооружение, проектная группа.

Для цитирования: Петроченко М.В. Комплексная имитационная модель исследования показателей качества работы проектной организации при проектировании транспортных сооружений // Известия КГАСУ, 2025, № 4 (74), с. 252-267, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/74.22, EDN: UFPVPC

Comprehensive simulation model of the construction design organization quality indicators for transport facilities design

M. V. Petrochenko

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. *Problem statement.* The complexity and uniqueness of transport construction projects, reliability and safety of their operation place high demands on the quality of investment and construction projects. Despite a large number of studies in the field of scientific substantiation of quality management processes for designing transport structures, the problem of developing a methodological, regulatory and technical basis for assessing the quality of design teams and the design decisions made cannot be considered solved. *The purpose of the work* is to develop a comprehensive simulation model that allows substantiating the optimal organizational and technological scheme for project development, taking into account the uncertainty of the initial data and the probabilistic nature of information and resource support for the design process, as well as the economic uncertainty of construction and operation of the designed transport structure. *The objectives of the study* are to determine the optimal size of the design team; to formulate requirements for the qualifications of specialists included in the group; to distribute functional responsibilities among specialists; to develop an organizational and technological design scheme; to evaluate the quality of the design team. *Results.* A methodological approach to assessing the quality of the design team's work in the implementation of organizational and technological schemes for designing transport structures is proposed. *Conclusions.* The proposed comprehensive simulation model allows us to investigate the impact of design team composition on the quality of design decisions; study the impact of automated design systems and innovative design technologies on the timeframe and quality of decisions; identify a set of measures to reduce design timeframes and improve the quality of transport construction projects; justify the composition of the design team, taking into account the effective and efficient distribution of design tasks among specialists in accordance with their qualifications and experience.

Keywords: simulation model, quality indicator, transport facility, design team.

For citation: Petrochenko M.V. Comprehensive simulation model of the construction design organization quality indicators for transport facilities design // News of KSUAE, 2025, № 4 (74), p. 252-267, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/74.22, EDN: UFPVPC

1. Введение

Развитие транспортной инфраструктуры, повышение качества транспортного строительства и безопасности работы транспортных сооружений признаны приоритетными направлениями государственной политики [1, 2]. Свидетельством этому являются принятые и реализуемые национальные, федеральные и региональные проекты развития транспортной системы¹².

Качественные характеристики транспортных сооружений определяются качеством их проектирования [3]. Непосредственно качество проектов достигается комплексным применением трех основных способов: разработкой конкурирующих вариантов проекта и выбором лучшего из них в системе четко установленных критериев; поиском оптимальных проектных решений с применением инновационных технологий проектирования; обоснованностью организационно-технологических схем проектирования и подбором состава проектных групп.

Применение каждого из этих способов позволяет управлять качеством проекта. Однако, необходимо отметить, что реализация первых двух способов в полной мере

¹ Национальный проект «Эффективная транспортная система»

² Государственная программа Российской Федерации «Развитие транспортной системы» от 20.12.2017 г. №1596

возможна только при правильном подборе состава проектных групп, организации их работы, технического и программного обеспечения проектной деятельности. Наибольший эффект достигается при комплексном применении всех трех способов.

Качество проекта будет зависеть от качества работы каждого специалиста в проектной группе. Для создания эффективной проектной группы необходимо определить оптимальный численный состав группы; сформировать требования к квалификации специалистов, зная специфику проекта; подобрать специалистов и распределить функциональные обязанности; разработать организационно-технологическую схему проектирования. При этом необходимо учитывать следующие особенности и специфику выполнения проектных работ в транспортном строительстве: вероятностный характер и недостаточную достоверность исходных данных для проектирования; изменение исходных данных во времени (показателей ресурсного обеспечения, состава, режимов и интенсивности транспортных потоков и др.); сочетание линейно-протяженных и площадных объектов; значительную капиталоемкость строительства транспортных сооружений; размещение строящихся объектов не только в разных природно-климатических, грунтово-геологических и гидрологических условиях, но и в разных природно-климатических зонах; соответствие целям социально-экономического развития и территориальной целостности государства и др. [4].

Показатели качества работы проектных групп и методы их оценки, учитывающие рассмотренные особенности, в полной мере не исследованы и не разработаны. Во многом это объясняется сложностью формализации структурообразующих факторов, условий и особенностей транспортного проектирования, а также их совокупного воздействия на качество работы проектных групп. Вероятностный характер этих факторов требует обоснования статистических характеристик показателей качества работы не каждого специалиста в отдельности, а проектной группы в целом, что необходимо для оценки конечного результата ее деятельности [5, 6].

Стохастичность и нестационарный характер факторов и условий разработки проекта влияет на топологию сетевых моделей выполнения работ [7, 8]. Чем больше степень неопределенности исходных данных для проектирования и квалификации специалистов в области принятия оптимальных проектных решений, тем выше риск разработки проекта, не обеспечивающего требуемые показатели целевого предназначения, надежности, безопасности и экономичности транспортного объекта, а также срыва установленных сроков проектирования. Поэтому показателями качества работы проектной группы с учетом стохастичности влияющих на процесс проектирования факторов могут быть: степень риска разработки проекта в установленные сроки и вероятность соответствия принимаемых проектных решений эталонным (наилучшим для соответствующих целей, условий строительства и эксплуатации уникального транспортного сооружения) [9].

Формирование проектных групп или организаций, соответствующих необходимым значениям этих показателей, требует разработки методов их оценки. На сегодняшний день существует проблема разработки методологической и нормативно-технической базы оценки качества работы проектных групп и принимаемых проектных решений в транспортном строительстве [10, 11].

В известных научных работах [12-13] и нормативно-технических документах по управлению проектами³⁴ для обоснования организационно-технологических схем проектирования предлагается использовать математические методы анализа сетей.

Однако, применение моделей сетевой оптимизации [15, 16] ограничивается следующими обстоятельствами:

- детерминированные сетевые модели работы проектных групп не позволяют учесть вероятностный характер времени выполнения проектных работ специалистами и группой в целом. Имеющаяся в этих моделях возможность рассматривать продолжительность работ

³ ГОСТ Р ИСО 21500-2023 Национальный стандарт Российской Федерации «Управление проектами, программами и портфелями проектов - Контекст и концепции»

⁴ ГОСТ Р 58184—2018 Национальный стандарт Российской Федерации «Система менеджмента проектной деятельности. Основные положения»

как случайную величину не отражает связи уровня квалификации специалиста с продолжительностью отработки проектных документов требуемого качества;

- модели сетевой оптимизации не позволяют учитывать стохастичность, уровень достоверности и нестационарный характер поступления исходной информации для проектирования. В связи с этим возникает необходимость корректировки или переработки проектных решений. Возвраты к ранее выполненным этапам проектирования возможны и по причине проектных ошибок, обусловленных недостаточной квалификацией проектировщиков;

- применение традиционных сетевых моделей для построения организационно-технологических схем проектирования не обеспечивает возможности оценки качества разрабатываемых проектов, поскольку критерием оптимизации здесь выступает только время или его статистические характеристики.

Исходя из этого для оценки показателей качества работы проектной группы с учетом стохастических и динамических аспектов процессов проектирования требуется разработка комплексной имитационной модели, позволяющей:

1. Определить состав проектной группы с учетом эффективного и рационального распределения задач проектирования между специалистами в соответствии с их квалификацией и опытом работы.

2. Научно (объективно) обосновать оптимальную организационно-технологическую схему разработки проекта, учитывающую неопределенность исходных данных и вероятностный характер информационного, ресурсного обеспечения процесса проектирования, а также экономическую неопределенность строительства и эксплуатации проектируемого транспортного сооружения.

3. Оценить (спрогнозировать) качество работы проектной группы.

2. Материалы и методы

Математическая постановка задачи с учетом достижения обозначенных целей имитационного моделирования может быть сформулирована следующим образом.

Для разработки проекта формируется проектная группа (организация), имеющая в своем составе V структурных подразделений (отделов, отделений, исполнителей и др.). Известна система целей разработки проекта, имеющая иерархическую структуру. Достижение целей обеспечивается выполнением проектных работ, каждая из которых имеет свою значимость. Определены варианты организационной структуры и технология работы проектной группы. Для формирования проектной группы имеются кандидаты на должности, обладающие соответствующей квалификацией. Квалификация определяет качество (эффективность) работы a_{jv} j -го кандидата на v -ой должности ($j = 1, \dots, m; v = 1, \dots, N$).

Разработка проекта включает n стадий. Продолжительность реализации i -й стадии ($i = 1, \dots, n$) проекта директивно ограничена временем \bar{t}_i . Наряду с профессиональной подготовленностью, каждый кандидат в команду проекта характеризуется продолжительностью работы в аналогичной должности τ_j и в данной проектной организации τ_j' . Квалификация j -го кандидата, показатели τ_j и τ_j' определяют качество и время t_{ji} выполнения проектных работ на каждой из стадий проектирования. В ходе разработки проекта укомплектованность группы может меняться (выбытие в связи с болезнью, командировками, дефицитом специалистов). Подобные ситуации, а также неопределенность исходной информации для проектирования (данные изысканий, ресурсное обеспечение, финансирование и др.) приводят к увеличению продолжительности разработки проекта и могут вызвать необходимость корректировки уже отработанных документов. Эти события являются случайными и характеризуются вероятностями возвратов P_{ie} с текущих (i) на ранее реализованные (e) стадии (этапы) проектирования ($i = 1, \dots, n; e = 1, \dots, n$).

Требуется обосновать оптимальную организационно-технологическую схему разработки проекта и оценить качество работы проектной группы (организации), за показатель которого принимается вероятность выполнения проектных работ с требуемым качеством в рассматриваемых условиях и в заданное время. При этом уровень требуемого качества определяется на основе сравнения качества решений, принимаемых высококвалифицированным (эталонным) специалистом в заданное время, с качеством решений, принимаемых специалистами сформированной группы при фактическом состоянии их профессиональной подготовленности.

Алгоритм имитационного моделирования работы проектной группы при реализации принятой организационно-технологической схемы проектирования включает следующие этапы.

Этап 1. Моделирование подбора и расстановки специалистов на должности для разработки проекта транспортного сооружения в соответствии с организационно-технологической схемой выполнения проектных работ.

Моделирование сводится к выполнению следующих действий:

1. Определяются цели проектной организации, строится граф (дерево) целей $G(Q, K)$ и выполняется оценка их значимости. При этом используются известные принципы оптимального целеполагания [15, 16].

Для оценки значимости целей g_i применяется формула (1):

$$g_i = \frac{k_i \left(\sum_{s=1}^n \delta_{is} k_s + k_i \right)}{\sum_{i=1}^n k_i \left(\sum_{i=1}^n \delta_{is} k_s + k_i \right)}, \tag{1}$$

где k_i – иерархический показатель (уровень) i -ой цели;

$\delta_{is} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-ая цель влияет на выполнение } s\text{-ой цели;} \\ 0, & \text{при невыполнении этого условия.} \end{cases}$

2. Формируется перечень проектных работ (конструктивные, экспериментальные и др. работы) $z_l (l=1, \dots, h)$, за счет которых достигаются цели разработки проекта. Эти работы образуют матрицу $Z = \|z_{li}\|$. На основе анализа этой матрицы оценивается значимость работ γ по зависимости (2):

$$\gamma_i = \frac{\sum_{i=1}^n z_{li} g_i}{\sum_{l=1}^h \sum_{i=1}^n z_{li} g_i}, \tag{2}$$

где $z_{li} = \begin{cases} 1, & \text{если } l\text{-ая работа влияет на выполнение } i\text{-ой цели;} \\ 0, & \text{при невыполнении этого условия.} \end{cases}$

3. Строится матрица инцидентий, характеризующая связи проектных работ с должностями $D = \|d_{vl}\|$. Взаимосвязь работ и должностей определяется в соответствии с функциональными обязанностями по каждой из них. Значимость специалистов (должностей) для разработки проекта M_v рассчитывается по формуле (3):

$$M_v = \frac{\sum_{l=1}^k d_{vl} \gamma_l}{\sum_{v=1}^N \sum_{l=1}^k d_{vl} \gamma_l}, \tag{3}$$

где $d_{vl} = \begin{cases} 1, & \text{если } l\text{-ая работа входит в круг обязанностей по } v\text{-ой должности;} \\ 0, & \text{при невыполнении этого условия.} \end{cases}$

4. Формируется матрица $A^0 = \|a_{jv}\|$, характеризующая эффективность работы кандидатов для включения в команду проекта. Для оценки качества работы j -го кандидата на v -ой должности a_{jv} применяется формула (4):

$$a_{jv} = M_v Y_j^k \psi_v, \quad (j = 1, \dots, m), \quad (v = 1, \dots, N), \quad (4)$$

где Y_j^k – уровень квалификации j -го кандидата; ψ_v – показатель, характеризующий сложность v -ой должности. Порядок расчета показателя Y_j^k и его сущность изложены автором в работе [19]. Необходимо отметить, что этот показатель характеризует производительные затраты времени конкретного специалиста при выполнении проектных работ.

Сложность работ ψ_v соответствует удельным затратам времени на выполнение проектных работ по v -ой должности s -го уровня иерархии проектной организации ($s = 1, \dots, p$). Более высокому уровню соответствует большее количество решаемых задач. Однако, они решаются с меньшей детализацией. Потому ψ_v можно определить по формуле (5):

$$\psi_v = \frac{\lg(s+1)}{\lg(p+1)} = \begin{cases} \psi_v = 0 & \text{при } s = 0 \\ 0 < \psi_v < 1 & \text{при } s > 1, \\ \psi_v = 1 & \text{при } s = p \end{cases} \quad (5)$$

где p – количество иерархических уровней.

Необходимо отметить, что показатель a_{jv} является мерой качества использования каждого кандидата на каждой из должностей. Он определяет долю общего объема проектных работ, выполняемых j -ым специалистом на v -ой должности в единицу времени.

5. Строится матрица назначений $X = \|x_{jv}\|$, удовлетворяющая условиям:

$$1) \sum_{j=1}^m \sum_{v=1}^N a_{jv} x_{jv} = \max, \quad 2) \sum_{j=1}^m x_{jv} \leq 1, \quad 3) \sum_{v=1}^N x_{jv} \leq 1.$$

Условие (1) соответствует цели формирования проектной группы (максимизация качества выполнения проектных работ), а условие (2) следующим ограничениям:

$$a) \quad x_{jv} = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-ый кандидат назначен на } v\text{-ую должность;} \\ 0, & \text{при невыполнении этого условия.} \end{cases}$$

б) сумма элементов в каждой строке и каждом столбце матрицы X равна 1 (это означает, что на каждую должность будет назначен один специалист).

Такая постановка задачи формирования группы соответствует модели линейного программирования. Решение этой задачи выполняется с применением алгоритма Флада.

Этап 2. Моделирование работы проектной группы при реализации организационно-технологических схем проектирования транспортных сооружений.

Реализация этого этапа требует обоснования способа и алгоритма работы проектной группы. Анализ существующих методов моделирования работы проектных и научно-исследовательских организаций с целью оценки качества результатов их деятельности позволяет сделать следующие выводы.

Во-первых, представляется неточным оценивание качества работы проектных групп с использованием структурных схем надежности [20], поскольку этот метод заимствован из теории простых систем и основывается на статистической независимости элементов системы. В сложных системах, каковыми являются проектные организации (группы), показатели структурной связности неприемлемы, так как не учитывают взаимозаменяемости специалистов. Попытка усовершенствования этой методики введением коэффициентов взаимозаменяемости принципиально нового ничего не дала, потому что осталось неопределенным главное – механизм перераспределения обязанностей между специалистами.

Во-вторых, применение для оценки качества работы проектных организаций (групп) методов корреляционно-регрессионного анализа [21] также невозможно ввиду отсутствия представительной статистики между результатом деятельности специалистов и их квалификацией при работе в составе группы.

В-третьих, исследование опыта оценивания деятельности работы проектных групп с применением линейных оптимизационных моделей тоже нельзя признать достоверным ввиду отсутствия линейной связи между временем разработки проекта и квалификацией специалистов.

В связи с этим для моделирования работы проектной группы целесообразно использовать методы имитационного моделирования с применением следующего алгоритма:

1. В соответствии принятой организационно-технологической схемой разработки проекта осуществляется построение сетевой модели, отражающей работы, выполняемые каждым специалистом. Построенная сетевая модель отображается в матричной форме (6). В полученной матрице $T = \|\bar{t}_{ij}\|$, ($i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m$), n соответствуют числу этапов работы группы, m – количеству специалистов, а \bar{t}_{ij} означает директивное (заданное) время разработки элементов проекта j -ым специалистом на i -ом этапе:

$$T = \|\bar{t}_{ij}\| = \begin{vmatrix} \bar{t}_{11} & \bar{t}_{12} & \dots & \bar{t}_{1n} \\ \bar{t}_{21} & \bar{t}_{22} & \dots & \bar{t}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{t}_{m1} & \bar{t}_{m2} & \dots & \bar{t}_{mn} \end{vmatrix} \quad (6)$$

2. Преобразование матрицы $T = \|\bar{t}_{ij}\|$ к новой форме (11), позволяющей учитывать вероятностные факторы разработки проекта. Такими факторами являются изменение исходных данных (финансирование, данные изысканий, ресурсное обеспечение, ошибки проектировщиков и др.), вызывающее необходимость корректировки принятых или разработки новых конструктивно-технических и технологических решений.

С этой целью осуществляется построение матрицы вероятностей возвратов $P = \|p_{ie}\|$ работы специалистов проектной группы с текущих на пройденные этапы с целью корректировки ранее принятых проектных решений (« i » и « e », что, соответственно, означают номера этапов, из которых и в которые происходит возврат):

$$P = \|p_{ie}\| = \begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nm} \end{vmatrix}. \quad (7)$$

Количественные значения элементов матрицы $P = \|p_{ie}\|$ могут быть получены на основе статистического анализа процессов управления качеством проектов. Вероятности возвратов определяются исходя из анализа потока информации, поступающей в проектную группу. Из всех поступивших сообщений, образующих множество $\{B\}$, выделяются сообщения $\{b_{ie}\}$, которые требуют переработки принятых решений, начинающихся с того или иного этапа работы проектной группы. При этом вероятности возвратов могут быть рассчитаны по формуле (8):

$$p_{ie} = \frac{b_{ie}}{B}. \quad (8)$$

Поскольку событие, вызывающее необходимость переработки ранее принятых решений, является случайным, то и время разработки проекта требуемого качества будет случайной величиной. Для определения статистических характеристик сроков разработки проекта необходимо определить процедуру моделирования событий, вызывающих возвраты. С этой целью можно воспользоваться методом Монте-Карло. Вполне понятно,

что из каждого текущего этапа может возникнуть необходимость возврата на каждый из пройденных этапов. При этом в конкретный момент времени τ_i возврат возможен только к одному из этапов. Для учета этой ситуации необходимо сгенерировать равномерно распределенное число $\xi \in [0, \dots, 1]$. Затем найти интервал $(v + 1)$, в котором оно окажется, из соотношения:

$$\sum_{k=0}^v P_{ie_k} < \xi \leq \sum_{k=0}^{v+1} P_{ie_k}, \quad v = 0, \dots, s. \quad (9)$$

Найденный интервал соответствует номеру этапа, с которого необходимо начать корректировку проектных решений.

Помимо имитации номера этапа, с которого необходимо начать переработку, требуется смоделировать дискретное время наступления событий, требующих соответствующей переработки. Моделирование времени между событиями τ_i осуществляется методом обратных функций:

$$\tau_i = -\frac{1}{\mu} \ln \zeta_i, \quad (10)$$

где ζ_i – случайное число, равномерно распределенное в интервале $(0,1)$; μ – частота поступления информационных сообщений в ходе проектирования.

Имитация событий возвратов и времени их наступления позволяет скорректировать матрицу $T = \|\overline{t_{ij}}\|$ и привести ее к следующему виду:

$$T^* = \|\overline{t_{ij}}\| = \begin{vmatrix} \alpha_{11} r_{11} t_{11} & \alpha_{12} r_{12} t_{12} & \dots & \alpha_{1n} r_{1n} t_{1n} \\ \alpha_{21} r_{21} t_{21} & \alpha_{22} r_{22} t_{22} & \dots & \alpha_{2n} r_{2n} t_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{m1} r_{m1} t_{m1} & \alpha_{m2} r_{m2} t_{m2} & \dots & \alpha_{mn} r_{mn} t_{mn} \end{vmatrix}, \quad (11)$$

где r_{ij} , α_{ij} – соответственно кратность и степень переработки i -го этапа проектирования j -ым специалистом (случайная величина α_{ij} определяется в предположении о равномерности ее распределения на полуинтервале $(0,1]$); t_{ij} – фактическое время работы j -го специалиста на i -ом этапе при его первоначальной отработке с учетом требований к качеству проектных решений.

Фактическое время работы рассчитывается по формуле (12):

$$t_j = \frac{\delta_j \exp\left(-\frac{\tau_j \overline{T}_{сл} + \tau'_j \overline{T}_{нав}}{\overline{T}_{сл} \overline{T}_{нав}}\right)}{\delta_3} \overline{t}_j, \quad (12)$$

где δ_j и δ_3 – соответственно величина непроизводительных затрат времени j -го специалиста и высококвалифицированного специалиста ($\delta_j = 1 - Y_j^k$; $\delta_3 = 1 - Y_3^k$); $\overline{T}_{сл}$ и $\overline{T}_{нав}$ – соответственно среднее время совместного выполнения специалистами проектных работ в составе группы и среднее время приобретения специалистами практических навыков; \overline{t}_j – нормативное (директивное) время принятия проектных решений и их разработки.

3. Рассчитывается фактическое время выполнения работ специалистами на этапах (стадиях) разработки проекта t_{ij}^k с учетом их профессиональной подготовленности Y_j^k и затраты времени на разработку проекта без учета его корректировки:

$$T^* = t_1 + t_2 + \dots + t_n, \quad (13)$$

где t_i - максимальное время выполнения работ i -го этапа, $t_i = \max\{t_{ij}\}$.

Этап 3. Определение статистических характеристик времени разработки проекта с учетом требований к его качеству.

Прежде чем приступить к логико-математическому описанию этого этапа необходимо пояснить, каким образом учитываются требования к качеству проекта. Эти требования реализуются посредством сравнения квалификации специалиста проектной группы с квалификацией эталонного (высококвалифицированного) специалиста, способного принимать решения требуемого качества в отведенное время (рис. 1).

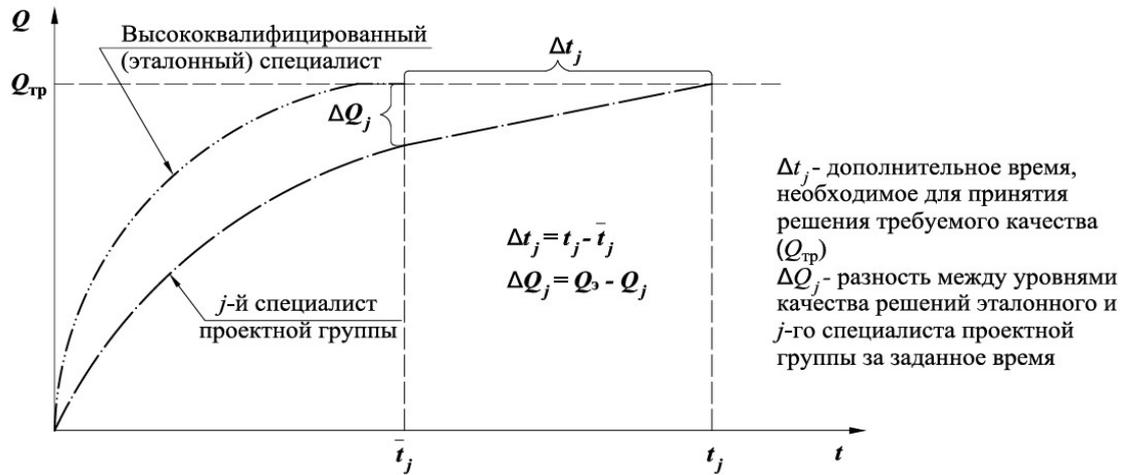


Рис. 1. Динамика качества проектных решений специалистов разной квалификации (иллюстрация автора)

Fig. 1. Dynamics of the quality of design solutions of specialists with different qualifications (illustration by the author)

Математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение времени разработки проекта оценивается на основе необходимого числа реализаций модели работы проектной группы по формуле (14):

$$T^{pn} = \max \{t_j^{pn}\} = \sum_{i=1}^n \left(t_{ij} + t_{ij} \sum_{i=1}^{r_{ij}-1} \alpha_{ij} \right), \quad (14)$$

где t_{ij} – время выполнения проектных работ на i -ом этапе j -ым специалистом; r_{ij} – кратность выполнения работ i -го этапа j -ым специалистом; α_{ij} – коэффициент, учитывающий изменение t_i при кратной отработке i -го этапа j -ым специалистом; T^{pn} – время, необходимое для разработки проекта требуемого качества; t_j^{pn} – время выполнения проектных работ по n этапам проекта j -ым специалистом.

Исследование качества работы проектной группы при неполной укомплектованности (болезнь, командировки специалистов и др.) осуществляется с использованием матрицы $X = \|x_{jv}\|$ (матрицы назначений).

Время выполнения проектных работ (t'_{il}) l -ым специалистом после переключения на него работ j -го (выбывшего специалиста) можно определить по формуле (15):

$$t'_{il} = t_{il} + \alpha_{jl} t_{ij}, \quad (15)$$

где t_{il} и t_{ij} – соответственно время выполнения работ l -ым и j -ым специалистами на i -ом этапе разработки проекта при полной укомплектованности; α_{jl} – коэффициент изменения t_{ij} при выполнении работы ij другим исполнителем.

Величина α_{jl} вычисляется по формуле (16):

$$\alpha_{jl} = \frac{\alpha_{jv}}{\alpha_{lv}}. \quad (16)$$

Рассчитанные показатели t'_{ij} , согласно построенной матрице $X = \|x_{jv}\|$, заносятся в матрицу $T^* = \|t'_{ij}\|$. После этого алгоритм вычислений возобновляется, начиная с формулы (13).

3. Результаты и обсуждение

Несмотря на значительное количество исследований [22, 23], выполненных в области оценки качества работы проектных организаций, разрабатываемая проектная документация зачастую содержит критические ошибки, неэффективные конструктивно-технологические решения, недостоверные сметные расчеты и др. Во многом это объясняется недооценкой вопросов формирования проектных групп и организаций с учетом квалификации специалистов, построения технологических схем организации их работы, неопределенности исходной информации для проектирования, нестабильности экономической ситуации [24]. Существующие принципы управления качеством проектной деятельности исходят из результатов оценки проектной документации установленным нормам. При этом не рассматриваются проблемы оценки квалификации, подбора и расстановки специалистов на должности в проектной организации, алгоритмы их работы в условиях неполноты, не полной достоверности, экономической неопределенности данных для принятия обоснованных и эффективных проектных решений [25, 26]. Выполненные в этой области исследования базируются на применении рейтинговых систем количественной оценки качества проектных организаций, отличающихся значительным субъективизмом. В них не раскрываются вопросы определения состава групп в соответствии с целевым предназначением, времени и качества разработки проектных решений в зависимости от квалификации специалистов, технического оснащения проектных организаций.

По сравнению с имеющимися, предлагаемый методологический подход к оценке качества работы проектной группы при реализации организационно-технологических схем проектирования транспортных сооружений учитывает стохастические аспекты разработки проекта, обусловленные неполнотой и вероятностным характером исходной информации проектирования, влиянием профессиональных компетенций проектировщиков на показатели качества проекта, экономической неопределенностью материально-технического обеспечения проектных, строительных работ и эксплуатации транспортных сооружений, вероятностным характером перспективной динамики состава и интенсивности транспортных потоков и др. При этом уровень качества работы проектной организации определяется в сравнении с эталоном, в качестве которого принимается организация, в которой все специалисты имеют высокую квалификацию, опыт работы в занимаемой должности и данной организации. Комплексная имитационная модель исследования показателей качества работы проектной организации при проектировании транспортных сооружений позволяет получить статистические характеристики времени разработки проекта с учетом требований к его качеству на основе сравнения с эталоном. Исходя из этого, появляется возможность определять такой состав проектной группы, ее оснащение и организационно-технологическую схему проектирования, которые обеспечат с требуемой вероятностью разработку проекта в установленные сроки на уровне, принятом за эталонный.

Верификация комплексной имитационной модели выполнена на основе упрощенного примера реализации организационно-технологической схемы проектирования транспортного сооружения. В составе проектной организации рассмотрена одна проектная группа численностью пять человек. Статистические данные о математическом ожидании времени выполнения аналогичных проектных работ высококвалифицированными специалистами представлены в табл. 1.

В ячейках табл. 1 приведены затраты времени на выполнение проектных работ с требуемым качеством специалистами на каждом этапе проектирования. В строке «длительность этапов» указаны их продолжительности без учета переработки документов, вызванной недостоверностью исходной информации для проектирования. Строка «кратность этапов» отражает увеличение их продолжительности в связи с переработкой документов из-за недостоверности исходной информации. В строке «длительность

этапов*» рассчитаны продолжительности этапов с учетом переработки документов, а в строке «суммарное время» - общее время разработки проекта транспортного сооружения.

Таблица 1

Статистические данные о математическом ожидании времени выполнения проектных работ (величина отклонения составляет $\pm 20\%$)

Специалисты		Этапы выполнения проекта			
№ п/п	Уровень квалификации	1 этап	2 этап	3 этап	4 этап
1	1,00	13	18	21	10
2	1,00	17	22	27	15
3	1,00	15	20	22	12
4	1,00	14	25	25	18
5	1,00	12	19	23	14
Длительность этапов, дн.		17	25	27	18
Кратность этапов		1	1,1	1,2	1
Длительность этапов*, дн.		17	27,5	32,4	18
Суммарное время, дн.					95

Оценка времени выполнения проектных работ при первоначально принятой организационно-технологической схеме представлена в табл. 2.

Таблица 2

Оценка времени выполнения проектных работ при первоначально принятой организационно-технологической схеме (требуемое время выполнения проектных работ 110 дней)

Специалисты		Этапы выполнения проекта			
№ п/п	Уровень квалификации	1 этап	2 этап	3 этап	4 этап
1	0,9	14,3	19,8	23,1	11
2	0,7	22,1	28,6	35,1	19,5
3	0,8	18	24	26,4	14,4
4	0,7	18,2	32,5	32,5	23,4
5	0,9	13,2	20,9	25,3	15,4
Длительность этапов, дн.		22,1	32,5	35,1	23,4
Кратность этапов		1	1,1	1,2	1
Длительность этапов*, дн.		22,1	35,75	42,12	23,4
Суммарное время, дн.					124

В табл. 2 в ячейках указаны затраты времени на выполнение каждого этапа проектных работ каждым специалистом в соответствии с его квалификацией при первоначально принятой организационно-технологической схеме проектирования. Остальные элементы таблицы соответствуют элементам табл. 1.

Результаты имитационного моделирования времени выполнения проектных работ с учетом оптимизации организационно-технологической схемы представлены в табл. 3.

В табл. 3 в ячейках смоделированы значения затрат времени на выполнение проектных работ с требуемым качеством с учетом перераспределения этих работ между специалистами. В результате данного перераспределения суммарное время выполнения

проектных работ сокращено на 19 дней и обеспечено выполнение проектных работ в установленные сроки.

Таблица 3

Результаты имитационного моделирования времени выполнения проектных работ

Специалисты		Этапы выполнения проекта			
№ п/п	Уровень квалификации	1 этап	2 этап	3 этап	4 этап
2	0,7	16,9	23,4	27,3	13,0
1	0,9	18,7	24,2	29,7	16,5
3	0,8	18,0	24,0	26,4	14,4
5	0,9	15,4	27,5	27,5	19,8
4	0,7	15,6	24,7	29,9	18,2
Длительность этапов, дн.		18,7	27,5	29,9	19,8
Кратность этапов		1	1,1	1,2	1
Длительность этапов*, дн.		18,7	30,25	35,88	19,8
Суммарное время, дн.					105

На рис. 2 проиллюстрированы результаты решения задачи по оптимизации организационно-технологической схемы проектирования транспортного сооружения для достижения требуемого качества проекта.

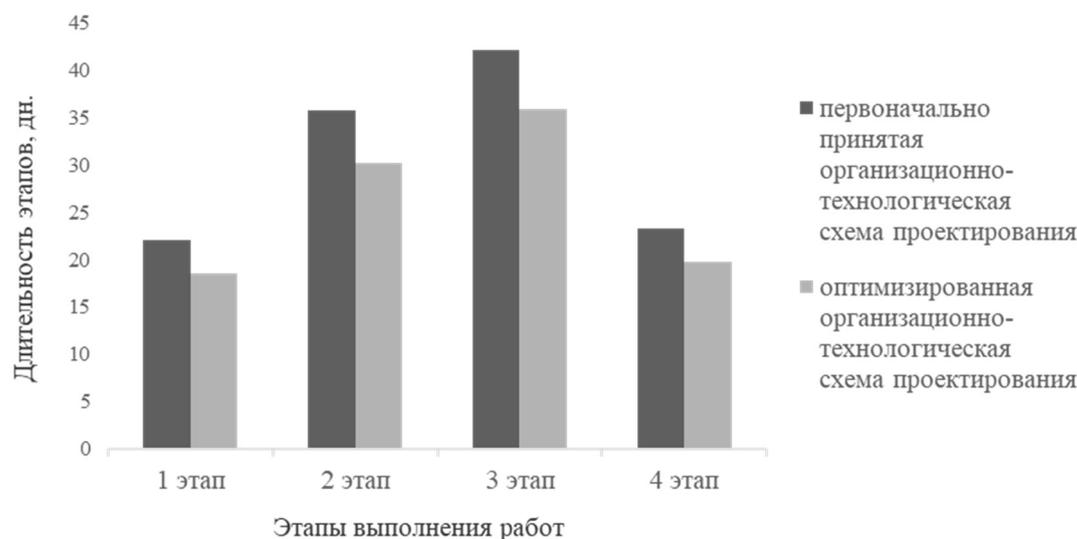


Рис. 2. Диаграмма сравнения затрат времени на выполнение проектных работ с требуемым качеством без применения и с применением имитационной модели (иллюстрация автора)

Fig. 2. Comparison chart of the time costs for completing design work with the required quality without and with the use of a simulation model (illustration by the author)

Анализ полученной диаграммы показал, что комплексная имитационная модель позволяет сократить сроки проектирования и повысить качество разработки проектной документации.

4. Заключение

Таким образом, комплексная имитационная модель позволяет обеспечить достижение целей и решение задач, заключающихся в обосновании оптимального численного состава проектных групп; обосновании требований к квалификации специалистов каждой группы; распределении функциональных обязанностей между специалистами; разработке организационно-технологической схемы проектирования;

оценке качества работы проектной группы, а значит и качества разработки проекта. Свидетельством этому являются результаты имитационного моделирования, представленные в виде диаграммы оценки эффективности применения комплексной имитационной модели исследования показателей качества работы проектной организации при проектировании транспортных сооружений, построенной на основе исходных данных и результатов моделирования рассмотренного примера. Имитационная модель обеспечивает возможность исследовать влияние квалификации специалистов на качество принимаемых проектных решений, а также изучать влияние систем автоматизированного проектирования и инновационных технологий выполнения проектных работ на сроки и качество принимаемых решений.

Список литературы/ References

1. Зубец А.Ж. Государственная политика поддержки и направления развития транспортной отрасли Российской Федерации // Вестник Московского университета им. С.Ю. Витте. Серия 1: Экономика и управление. 2019. № 3 (30). С. 28–34. DOI: 10.21777/2587-554X-2019-3-28-34
Zubets A.Z. State policy of support and development directions of the transport industry of the Russian Federation // Bulletin of Moscow Witte University. Series 1: Economics and Management. 2019. No. 3 (30). P. 28–34. DOI: 10.21777/2587-554X-2019-3-28-34
2. Башкарев А.А. Развитие транспортной инфраструктуры как одна из приоритетных задач многонационального государства (на примере Северо-Западного Федерального округа) // Путевой Навигатор. 2022. № 52 (78). С. 52–61. EDN XBKFKT
Bashkarev A.A. Development of transport infrastructure as one of the priority tasks of a multinational state (using the example of the Northwestern Federal District) // Travel Navigator. 2022. No. 52 (78). P. 52–61. EDN XBKFKT
3. Розанцева Н.В. Организация строительства линейного объекта с учетом существующего ряда ошибок // Путевой навигатор. 2024. № 58(84). С. 92–99. EDN ZVETJZ
Rozantseva N.V. Organization of construction of a linear facility taking into account a number of existing errors // Travel Navigator. 2024. No. 58(84). P. 92–99. EDN ZVETJZ
4. Белоусов В.Е., Бутырина Н.А., Маилян Л.Д. Управление временными параметрами процессов в адаптивной интеллектуальной системе управления проектированием // Проектное управление в строительстве. 2024. № 2(31). С. 62–71. EDN MKPZGE
Belousov V.E., Butyrina N.A., Mailyan L.D. Management of time parameters of processes in an adaptive intelligent design management system // Project management in construction. 2024. No. 2(31). P. 62–71. EDN MKPZGE
5. Antucheviciene J., Kalašová J., Rimašauskas A. Fuzzy Stochastic Optimization Model for Solving the Personnel Assignment Problem in IT Projects // Journal of Business Economics and Management. 2021. No. 22(1). P. 78–95. DOI: 10.3846/jbem.2020.13455
6. Cheverda S., Yankin D. Application of fuzzy modeling for task allocation in IT project management // Sciences of Europe. 2023. No. 128. P. 8–15. DOI: 10.5281/zenodo.10081860
7. Velichkin V., Petrochenko M., Gorodishenina A., Bokovaya N. Risks and reliability assessment of construction processes // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 274. P. 06008. DOI: 10.1051/e3sconf/202127406008
8. Болотин С.А., Вихров А.Н., Гладий Н.Я., Малкин М.М. Анализ несвоевременности выполнения работ с позиции теории нелинейных динамических систем // Вестник гражданских инженеров. 2008. № 1. С. 33–38
Bolotin S.A., Vikhrov A.N., Gladiy N.Ya., Malkin M.M. Analysis of untimely execution of works from the standpoint of the theory of nonlinear dynamic systems // Bulletin of Civil Engineers. 2008. No. 1. P. 33–38

9. Бондаренко Ю.В., Васильчикова Е.В. Математические методы поддержки сетевого анализа проекта и оценки риска планирования при нечеткой информации о продолжительностях работ. Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2023. № 2. С. 100–111. DOI: 10.17308/sait/1995-5499/2023/2/100-111
Bondarenko Yu.V., Vasilchikova E.V. Mathematical methods for supporting project network analysis and assessing planning risks with fuzzy information on work duration // Bulletin of VSU, series: System analysis and information technologies. 2023. No. 2. P. 100–111. DOI: 10.17308/sait/1995-5499/2023/2/100-111
10. Locatelli G., Ika L., Drouin N., Müller R., Huemann M., Söderlund J. et al. A Manifesto for project management research // European Management Review. 2023. No. 20(1). P. 3–17. DOI: 10.1111/emre.12568
11. Петровская И.В. Неопределенность и сложность как вызовы классическому управлению проектами в эпоху пятого технологического уклада // Страховое дело. 2020. № 12 (333). С. 50–61. EDN: VBOAPJ
Petrovskaya I.V. Uncertainty and Complexity as Challenges to Classical Project Management in the Era of the Fifth Technological Order // Insurance Business. 2020. No. 12 (333). P. 50–61. EDN: VBOAPJ
12. Иванова Т.Н., Иванов Д.В. Классический и гибкие подходы к управлению проектами // Бюллетень науки и практики. 2019. Т. 5. №10. С. 168–175. DOI: 10.33619/2414-2948/47/21
Ivanova T.N., Ivanov D.V. Classical and flexible project management approaches // Bulletin of Science and Practice. 2019. Vol. 5. No. 10. P. 168–175. DOI: 10.33619/2414-2948/47/21
13. Кузнецов Н.В., Першина Т.А. Проектный подход как инструмент реализации национальных проектов в России // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2023. Т. 14. № 4. С. 716–732. DOI: 10.18184/2079-4665.2023.14.4.716-732
Kuznetsov N.V., Pershina T.A. Project approach as a tool for the implementation of national projects in Russia // M I R (Modernization. Innovation. Research). 2023. Vol. 14. No. 4. P. 716–732. DOI: 10.18184/2079-4665.2023.14.4.716-732
14. Петров М.Н. Эволюция и направления развития парадигмы управления проектами // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2017. Т. 7. № 2А. С. 210–221. EDN: YSZHTB
Petrov M.N. Evolution and directions of development of the project management paradigm // Economics: Yesterday, Today and Tomorrow. 2017. Vol. 7. No. 2A. P. 210–221. EDN: YSZHTB
15. Окрепилов В.В. Экономика качества как методологическая основа управления регионами // Экономика и управление. 2013. №1. С.8–14. ISSN: 1998-1627. EDN: PUZLJT
Okrepilov V.V. Economics for Quality as a Methodological Basis for Managing the Regions // Economics and Management. 2013. No. 1. P. 8–14. ISSN: 1998-1627. EDN: PUZLJT
16. Окрепилов В.В. Многоуровневая система управления качеством как инструмент модернизации экономики России // Научно-технические ведомости СПбПУ. Экономические науки. 2014. № 1 (187). С. 9–19. EDN: RXAMUR
Okrepilov V.V. Multilevel system of quality control as instrument of modernization of economy of Russia // Scientific and technical bulletins of STU. Economic Science. 2014. No. 1 (187). P. 9–19. EDN: RXAMUR
17. Ермошин Н.А., Романчиков С.А. Разработка организационно-технологических схем проектирования уникальных транспортных сооружений с использованием имитационных моделей // Цифровая экономика и инновации. 2021. №1. С. 22–30. DOI: 10.18323/2221-5689-2021-1-22-30
Ermoshin N.A., Romanchikov S.A. The development of organization and technological diagrams for designing unique transport facilities using simulation models // Digital Economy & Innovations. 2021. No. 1. P. 22–30. DOI: 10.18323/2221-5689-2021-1-22-30

18. Ermoshin N.A. Development of Organizational and Technological Schemes of Design of Unique Transport Constructions with Use of Simulation Models // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Science and Technology Conference “FarEastCon 2019”. Vol. 753. 4. Chapter 3. Vladivostok: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 042054. DOI 10.1088/1757-899X/753/4/042054. EDN WAXPBK
19. Петроченко М.В. Методика оценки качества кадрового потенциала проектной группы и влияние квалификации на проектные риски // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11. №1. С. 134–151. DOI: 10.17816/transsyst642802
Petrochenko M.V. Methodology for assessing the quality of human resources of a project team and the impact of qualifications on project risks // Modern Transportation Systems and Technologies. 2025. Vol. 11. No. 1. P. 134–151. DOI: 10.17816/transsyst642802
20. Белоусова М.В., Булатов В.В. Практическое применение цепей Маркова для выбора наилучшего типа резервирования автоматизированной системы // Современные наукоемкие технологии. 2022. Т. 10-1. № 9(25). С. 9–13
Belousova M.V., Bulatov V.V. Practical application of Markov chains to select the best type of backup of automated system // Modern high technologies. 2022. Vol. 10-1. No. 9(25). P. 9–13
21. Ворокова Н.Х., Горпинченко К.Н., Мамбетова А.А. Использование метода множественной регрессии в анализе производительности труда Российской Федерации // Управленческий учет. 2023. № 11-1. С. 199–205. DOI 10.25806/uu112023199-205
Vorokova N.Kh., Gorpinchenko K.N., Mambetova A.A. Using the multiple regression method in the analysis of labor productivity of the Russian Federation // Management Accounting. 2023. No. 11-1. P. 199–205. DOI 10.25806/uu112023199-205
22. Самарин А.Ю., Байбурин А.Х. Модульный подход к оценке качества проектных организаций // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2022. Т. 22. № 2. С. 52–60. DOI: 10.14529/build220207
Samarin A.Yu., Baiburin A.Kh. Modular Approach to Assessment of the Quality of Project Organization // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture. 2022. Vol. 22. No. 2. P. 52–60. DOI: 10.14529/build220207
23. Бондаренко Ю.В., Никитин И.С., Калинина Н.Ю., Ходунов А.М. Выбор методов оценки при формировании кадрового состава проектных команд // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2020. Т. 20. № 2. С. 116–124. DOI: 10.14529/ctcr200211
Bondarenko Yu.V., Nikitin I.S., Kalinina N.Yu., Khodunov A.M. Selection of Evaluation Methods when Forming Personnel of Project Teams // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics. 2020. Vol. 20. No. 2. P. 116–124. DOI: 10.14529/ctcr200211
24. Афанасьев В.Я., Воронцов Н.В., Байкова О.В. Анализ и оценка кадрового потенциала персонала организации на современном этапе // Вестник университета. 2020. №7. С. 5–13. DOI: 10.26425/1816-4277-2020-7-5-13
Afanasyev V.Y., Vorontsov N.V., Baykova O.V. Analysis and assessment of the human resources potential of the organization’s personnel at the present stage // University Bulletin. 2020. No. 7. P. 5–13. DOI: 10.26425/1816-4277-2020-7-5-13
25. Radwan K., Elhakeem A., Elbeltagi E. Resource assignment optimization in design firms // Ain Shams Engineering Journal. 2024. Vol. 15. Iss. 4. P. 102612. DOI: 10.1016/j.asej.2023.102612
26. Ma C., Zhang S., Zhuo J., Liu Y., Zhou, Y. Research on project group human resource allocation of construction enterprises based on decision tree algorithm // In 2022 2nd international conference on networking, communications and information technology. 2022. P. 193–196. DOI: 10.1109/NetCIT57419.2022.00055

Информация об авторах

Петроченко Марина Вячеславовна, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
E-mail: petrochenko_mv@spbstu.ru, ORCID: 0000-0002-4865-5319

Information about the authors

Marina V. Petrochenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation
E-mail: petrochenko_mv@spbstu.ru, ORCID: 0000-0002-4865-5319

Дата поступления: 23.09.2025

Дата принятия: 26.12.2025