

## Организационно - технологические решения установления взаимосвязей между параметрами строительного потока при разбивке общего фронта работ

С.Г. Шеина<sup>1</sup>, В.Я. Мищенко<sup>2</sup>, Ю.Д. Сергеев<sup>3</sup>, Р.Ю. Мясичев<sup>3</sup>,  
А.Ю. Сергеева<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва

<sup>3</sup>Воронежский государственный технический университет, Воронеж

**Аннотация:** В данной научной статье были рассмотрены вопросы взаимосвязей параметров потока во время процесса разбивки общего фронта строительных работ, операций и сопутствующих процессов. Главные факторы потока, которые оказывают свое влияние на время и продолжительность работ, это число частных фронтов (захваток), временной период, численность вариаций самих строительных работ. В данной работе была детально рассмотрена процедура установления взаимосвязей различных параметров потока. Согласно выводам проведенного анализа, установлено, что при учёте того факта, что при проектировании календарного плана не принимаются во внимание промежутки времени, выделенные для сверхпростых мероприятий и операций предстоящих подвидов строительных работ, требуется дополнительно принимать во внимание прогрессирование интервалов развертывания и свертывания потоков строительных работ (ресурсных комплексов, частных потоков) и фронтальных комплексов. Так же доказано, что детерминация взаимосвязей параметров потока связана с раздроблением разновидности работ на отдельные процессы, а общего фронта строительных работ - на частные, при том, что продолжительность выполнения процессов, из которых формируется график работ, является основной оценкой эффективности календарного плана.

**Ключевые слова:** организационно - технологические решения, надежность, контроль качества, эффективность, себестоимость, производительность труда.

Одними из важнейших определителей строительного потока, оказывающие воздействие на протяженность строительства служат охват видов строительно-монтажных работ, временной период их осуществления и численность захваток, т.е. частных фронтов работы [1]. В этих условиях количество частных фронтов предполагаем, как неизменяемую опцию потока.

Субстанциональные потоки по дистинктивности организации поточного процесса при разработке календарного графика, моделируемого в

технологические карты, воссоздают ритмичные или неритмичные потоки [2]. Определяя подтип организационно - технологических вопросов, формируется проектирование частного потока. Ввиду того, что одно из требований организации поточного процесса - это стремление к воспроизводству потока ритмичному, возникает задача разбивки общего фронта строительных работ если есть возможность, на одинаковые по величине частные [3]. Временной период потока равен сумме периодов процесса поточного строительства (рис. 1).

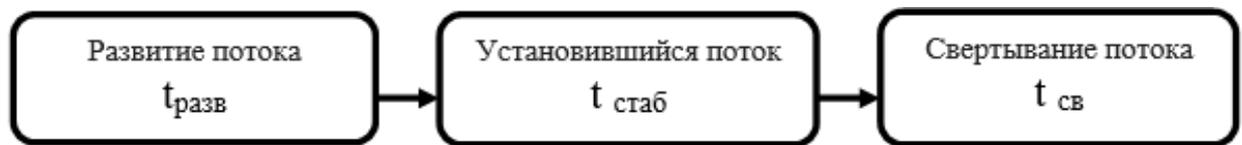


Рис.1. - Периоды процесса поточного строительства

$$T_o = T_{разв} + T_{стаб} + T_{св}$$

Фазы ритмичного потока развертывания ( $t_{разв}$ ) и свертывания ( $t_{св}$ ) равнозначны:

$$T_{разв} = T_{св} = (m - 1)k$$

Период установившийся:

$$T_{стаб} = (n - m + 1)k,$$

$$k = t / n.$$

В этой ситуации:

$$T_{стаб} = (n - m + 1) t / n = t [1 - (m - 1) / n],$$

где  $m$  – численность сверхпростых процессов производства;

$n$  – численность частных строительных фронтов;

$t$  – длительность сверхпростого процесса производства.

Выходит:

$$T_{стаб} = t [1 - (m - 1) / n] \Rightarrow \max.$$

По мере того, как увеличивается количество захваток, но резервируется в прежнем виде насыщенность частных строительных потоков [4, 5], общий временной период становится менее продолжительным (рис. 2).

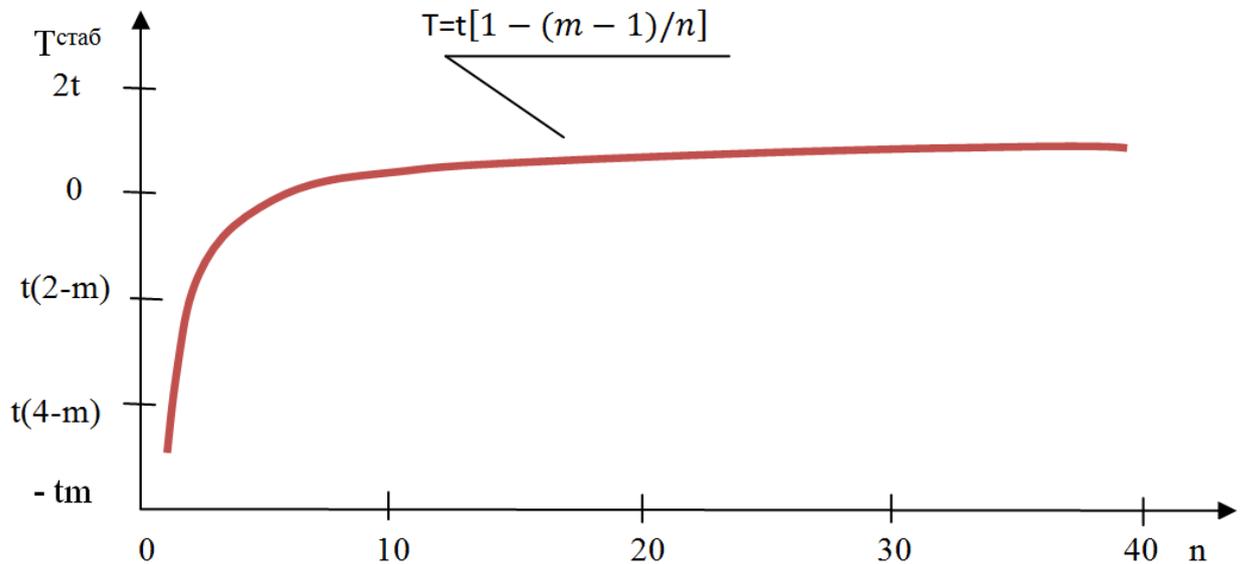


Рис. 2. – Связь установившегося периода в потоке и величиной частных фронтов

Временные интервалы, когда фронт работ представлен простыми операциям, в рамках данного процесса во внимание не принимаются [6]. По этой причине длительность строительных работ определяется неверно, и это в финальном итоге оказывает влияние на итоговое качество разработанных планов по выполнению рабочих процессов [7]. Время протекания потока в процессе составления проектных карт технологического процесса необходимо вычислять по формуле, где  $T_0$  представляет собой итоговую величину,  $Q$  - это общее количество ресурсов, делённое на число рабочих операций, плюс  $(m$  минус один) умноженное на коэффициент  $k$ , добавленный к времени перехода  $t$  между операциями. То есть получается следующее выражение:

$$T_0 = Q / N + (m - 1)k + t_{пер.}$$

Где  $Q$  – суммарные трудозатраты, чел.-дн;

$N$  – комплектация бригады, чел;

$m$  – величина частных потоков;

$k$  – это показатель темпа работы или ритма, определяющийся в сменах, равных 0,5-1 смены, либо в днях, соответствующих 1 рабочему дню;

$t$  пер. – это совокупность технологических пауз или перерывов, которые необходимы для обеспечения нормальной работы процесса, суммированная для всех операций и этапов.

В этой формуле каждая величина и параметр взаимодействуют между собой, учитывая организацию рабочего процесса, продолжительность пауз, количество работников, а также ритм выполнения работы и её временные затраты [8].

Обратим внимание на графическое изображение (рис. 3) где показано взаимное влияние между числом захваток, длительностью потока и использованием ресурсов. Расход ресурсов связан с величиной частных фронтов [9].

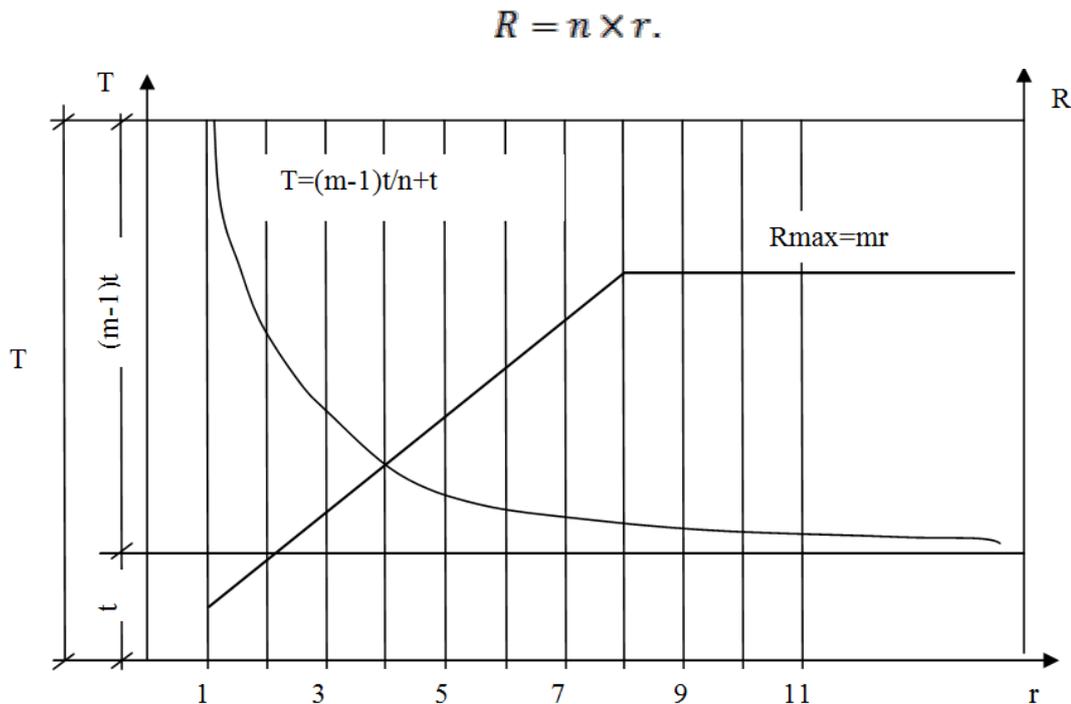


Рис. 3. - Взаимозависимость длительности потока и траты ресурса от численности частных фронтов

Возрастание частных фронтов расход ресурсов не завышает.

В таком случае, следующим уравнением можно выразить основную закономерность частного потока:

$$t = n \times k.$$

Захватка – это единица продукции потока. Закономерность потока будет выражаться следующим образом:

$$T = kn + (m - 1) \times k, \text{ но } k = \frac{t}{n} \Rightarrow T = \frac{(m - 1)t}{n} + t.$$

Обнаруженная закономерность, отражающая строительный поток, является фрагментом дробно-линейной математической функции, в которой графическое изображение представляет собой равнобочную гиперболу, а асимптоты этой гиперболы направлены строго параллельно осям координатной системы, что создаёт чёткую и ясную картину взаимосвязи между различными параметрами. Для того чтобы добиться максимальной результативности, эффективности и производительности в рамках всей длительности рабочего процесса, требуется детально изучить эту зависимость и найти наиболее подходящее по всем параметрам число частных фронтов работ [10, 11].

Основываясь на показанных зависимостях, можно с уверенностью заключить, что увеличение числа этих отдельных фронтов работ напрямую сокращает время, необходимое для развертывания каждого отдельного вида работ. Это даёт возможность урезать длительность и общую продолжительность рабочего потока, что положительно сказывается на организации всех рабочих процессов. Однако вместе с благоприятными факторами также растут и не благоприятные, а именно увеличивается количество работников и участников, временно вовлечённых в рабочий процесс, что увеличивает вероятность организационных сбоев и ошибок. Данный фактор нельзя не учитывать, т.к. он может быть достаточно весомым и негативно сказаться на всей продуктивности производственной цепи [12,

---

13]. То есть требуется найти такое оптимальное количество частных рабочих фронтов, которое обеспечит максимально эффективный положительный результат, в котором будет присутствовать наибольшее сокращение времени выполнения задач, а риски ошибок и последствия, связанные с ними, будут минимизированы [14]. Значительное снижение общей продолжительности всех этапов работы будет являться в данном случае главным критерием для оценки эффективности организации работ. В таком случае, если увеличение рабочих фронтов будет происходить даже на 1 единицу, оно должно будет обеспечить сокращение общего времени продолжительности потока хотя бы на одну единицу времени, чтобы считаться эффективным. Это является одним из основных индикаторов оптимизации рабочего процесса и эффективного достижения результатов [15].

Длительность всего потока, можно будет выразить следующим уравнением (при условии, что общий фронт работ будет поделен на определённое количество, а именно  $n$  отдельных частей):

$$T_n = (m - 1)t/n + t.$$

В таком случае при последовательном увеличении фронтов работ на одну единицу продолжительность всего потока будет равняться  $T_{n+1}$ , т.е.:

$$T_{n+1} = (m - 1)t/(n + 1) + t.$$

(Таким образом, определяется влияние увеличения числа частных фронтов на общее время выполнения всего рабочего потока. Что даёт возможность провести достаточно точную оценку экономии времени, так же, как и определить, на сколько улучшилась общая эффективность рабочего процесса). Для того чтобы при заданном параметре увеличения числа отдельных рабочих фронтов на единицу времени определить величину сокращения времени потока, будем использовать следующую формулу:

$$\Delta T = T_n - T_{n+1} = \frac{(m-1)t}{n} - \frac{(m-1)t}{n+1} = (m-1)t(1/n - 1/(n+1)).$$

---

$$\Delta T = \frac{(m-1)t}{n(n+1)} \geq 1.$$

Когда соотношение числителя и знаменателя достигнет равенства, будет наблюдаться уменьшение продолжительности потока на одну единицу времени. Это можно выразить через следующее уравнение:

$$t(m-1) = n^2 + n,$$

$$n^2 + n - t(m-1) = 0.$$

Оптимальное количество отдельных рабочих фронтов можно вычислить по следующей формуле:

$$n_{\text{оптим.}} \leq 0,5 + \sqrt{0,25 + t(m-1)}.$$

Из всего вышеуказанного можно заметить, что присутствует обратная зависимость общей продолжительности всего рабочего потока от количества отдельных рабочих фронтов. То есть чем больше число частных фронтов, тем быстрее выполняются работы и, следовательно, сокращается общее время, необходимое для завершения всех процессов. Таким образом, увеличение числа этих фронтов ведет к пропорциональному сокращению времени работы, что способствует более быстрой реализации всего проекта (рис. 4).

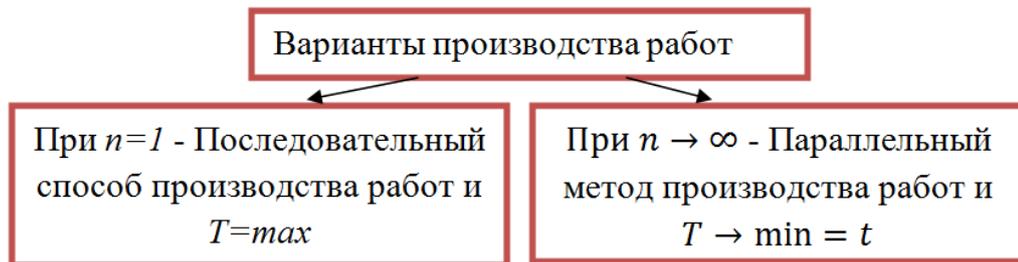


Рис. 4. - Вероятные методы производства работ

Исходя из этого, последовательный и параллельный методы представляют собой пределы поточной системы организации работ и процессов. Это означает, что каждый из этих подходов является максимальной степенью применения одного из принципов: либо работы в

строгой последовательности, либо выполнения множества операций одновременно. Эти два способа - основные и наиболее полные выражения поточной организации процессов, каждый из которых имеет свои особенности и ограничения в зависимости от условий.

Все частные потоки идентифицируется числом работников:

$$N = \frac{P}{t \times S} = \frac{Q}{t}.$$

$P$  - диапазон работ на  $n$  фронтах. Показывает необходимость выполнения всей совокупности задач в фокусе нескольких направлений.

$S$  - выработка работника в единицу времени в соответствующих единицах масштаба строительных работ. Этот показатель позволяет оценить эффективность работы каждого исполнителя и служит основой для дальнейших расчётов и планирования.

$Q$  - является трудоемкостью частного потока, которая характеризует общие затраты труда на выполнение задач в рамках конкретного потока работ. Этот показатель помогает более точно прогнозировать потребности в ресурсах и трудозатратах для успешного выполнения строительного процесса.

В таком случае, усреднённое количество работников для осуществления строительного потока:

$$N_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^m Q_i}{T} = \frac{\sum_{i=1}^m Q_i}{\frac{(m-1)t}{n} + t} = \frac{n \sum_{i=1}^m Q_i}{t(m+n-1)} = \frac{\sum_{i=1}^m Q_i}{\sum_{i=2}^m T_i + t_m}.$$

Интенсивность частного потока:

$$i = \frac{P_n}{t}.$$

Интенсивность всего строительного потока:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^m P_{ni}}{T} = \frac{\sum_{i=1}^m P_{ni}}{\frac{(m-1)t}{n} + t} = \frac{\sum_{i=1}^m P_{ni}}{\sum_{i=2}^m T_i^p + t_m}$$

Качество строительного потока оценивается показателями:

а) ритмичность потока:

$$\alpha = \frac{T''}{T} = \frac{n-m+1}{n+m-1};$$

б) продуктивность потока:

$$\beta = \frac{n}{T} = \frac{n^2}{t(n+m-1)};$$

в) показатель времени, затраченного на производство одной единицы продукции:

$$\gamma = \frac{T}{n} = \frac{t(n+m-1)}{n^2};$$

г) показатель сбалансированности использования материальных и нематериальных ресурсов:

$$\delta = \frac{n}{n+m-1}.$$

Каждый из этих показателей коррелирует с  $\delta$ , и имеет следующую зависимость:

$$\alpha = \delta - \frac{m-1}{n+m-1}; \quad \beta = \delta \frac{n}{t}; \quad \gamma = \frac{1}{\delta} \times \frac{t}{n}.$$

Однако в обычных условиях и в стандартных обстоятельствах нет причины применять данные индикаторы для анализа качества потока. Для заключения достаточно иметь понятие об индексе  $\delta$  (равномерность использования ресурсов) и индикаторе длительности развертывания строительного потока:

$$T_{\text{разверт.}} = \sum_{i=2}^m T_i^{\text{разверт}} = \sum_{i=1}^{m-1} \frac{t_i}{n},$$

т.к. они сами по себе могут использоваться для оценки эффективности различных возможных вариантов структурирования, формирования и организации потока.

Найдём точки оптимума (оптимальные точки), которые в случае, если они существуют, будут являться точками пересечения функций:

$$\frac{n}{n+m-1} = \frac{t}{n}.$$

Относительно  $n$  данное выражение будет иметь следующий вид:

$$n^2 - tn - (m-1)t = 0;$$

$$n = \frac{t \pm \sqrt{t^2 + 4t(m-t)}}{2}.$$

Таким образом, в процессе строительства имеются наиболее эффективные вариации численности рабочих фронтов, напрямую зависящих от числа принимающих участие в строительстве потоков частных и их длительности, так же, как и от объема потребляемых ресурсов для их выполнения.

Тем не менее важно учитывать, что указанные взаимосвязи применимы исключительно к ритмичным, гармоничным потокам, где последовательность и распределение ресурсов являются стабильными и предсказуемыми.

Для разноритмичных и неритмичных потоков требуется дополнительно учитывать увеличение продолжительности периодов развертывания и довершения свертывания разнообразных форм работ, тотальных систем, неизбежных при создании такого склада потоков с безостановочным ресурсоиспользованием, постоянным освоением рабочих фронтов, а также

наличием критически важных задач, которые требуют особого внимания и соблюдения временных рамок. Ко всему прочему стоит заметить, что совмещение операций на отдельных рабочих фронтах в объектных потоках является неприемлемым, так как это может привести к избыточным затратам ресурсов, а также нарушить общий баланс всех этапов работы, что делает процесс менее эффективным.

### Литература

1. Zalmai M.L., Аксай С., Manisali E. Time-cost optimization using harmony search algorithm in construction projects / Optimización del costo del tiempo, utilizando el algoritmo de búsqueda de armonía en proyectos de construcción // Revista de La Construcción. Journal of Construction (RDLC) is an international scientific journal. 2019. № 18 (2), pp. 226–237. doi: 10.7764/RDLC.18.2.226.
2. Алексейцев А.В. Обзор мирового опыта учета случайных организационных ожиданий при календарном планировании строительных проектов // Инженерный вестник Дона, 2022, №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8021.
3. Зорин В.Д., Юдин М.А., Власов Л.В., Попов Д.А., Гасанов Т.Я. Методика автоматизации работ по проекту организации строительства с получением календарного плана и графика финансирования // Инженерный вестник Дона. 2023. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2023/8227.
4. Шеина С.Г., Мищенко В.Я., Сергеев Ю.Д., Мясищев Р.Ю., Сергеева А.Ю. Организационно-технологические решения при выявлении взаимозависимостей между параметрами потока и себестоимостью выполнения работ // Инженерный вестник Дона, 2025, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2025/9825.

5. Kermanshachi, S., Rouhanizadeh, B. Sensitivity analysis of construction schedule performance due to increased change orders and decreased labor productivity // In Proceedings of the Annual Conference Canadian Society for Civil Engineering. Montreal, QC, Canada. 11-15 June, 2019. URL: [csce2019.ca/](http://csce2019.ca/).
  6. Yemelyanov D.I., Ponyavina N.A., Klokov I.A. Methods of work organization on complex restoration capital construction projects // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2024. №2 (62). pp. 63-69.
  7. Емельянов Д.И., Понявина Н.А., Клоков И.А., Андреева К.А. Применение матричных моделей и комплексного критерия оптимизации в календарном планировании строительного производства // Строительное производство. Научно-технический журнал. 2020. № 4. С. 51-57.
  8. Francis, A. Chronographical spatiotemporal scheduling optimization for building projects. *Frontiers in Built Environment*. 2019. № 5. doi: 10.3389/fbuil.2019.00036.
  9. Lim A.W.P., Latief Y. The development of safety plan using Work Breakdown Structure (WBS) for Building Information Modeling (BIM)-based building structure work // *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*. 2020. № 17 (2–3), pp. 1402–1413. doi: 10.1166/jctn.2020.8818.
  10. Chen, L., Lu, Q., Li, S., He, W., Yang, J. Bayesian Monte Carlo Simulation-Driven Approach for Construction Schedule Risk Inference // *Journal of Management in Engineering*. 2021. № 37 (2). doi: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000884.
  11. Liu D., Li H., Wang H., Qi C., Rose T. Discrete symbiotic organisms search method for solving large-scale time-cost trade-off problem in construction scheduling // *Expert Systems with Applications*. 2020. № 148 . doi: 10.1016/j.eswa.2020.113230.
-

12. Гинзбург А.В. Организационно-технологическая надежность строительных систем // Вестник МГСУ. Научно-технический журнал по строительству и архитектуре. 2010. №4-1. С. 251-255.

13. Новоселова И.В., Аль-Фатла А.Н.М., Дахнова Т.М. Организационно - технологические положения строительно - технических исследований по определению качества строительных конструкций// Инженерный вестник Дона, 2014, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2022/7923.

14. Titarenko B., Hasnaoui A., Titarenko R. Risk management system model for construction projects // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. Issue. 4. Art. №42019.

15. Biruk S., Jaśkowski P. Selection of the optimal actions for crashing processes duration to increase the robustness of construction schedules // Applied Sciences (Switzerland). 2020. № 10 (22), pp. 1–14. doi: 10.3390/app10228028

### References

1. Zalmai M.L., Akcay C., Manisali E. Revista de La Construcción. Journal of Construction (RDLC) is an international scientific journal. 2019. № 18 (2), pp. 226–237. doi: 10.7764/RDLC.18.2.226.

2. Aleksejcev A.V Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8021.

3. Zorin V.D., Judin M.A., Vlasov L.V., Popov D.A., Gasanov T.Ja Inzhenernyj vestnik Dona, 2023. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2023/8227.

4. Sheina S.G., Mishhenko V.Ya., Sergeev Yu.D., Myasishhev R.Yu., Sergeeva A.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona, 2025, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2025/9825.

5. Kermanshachi, S., Rouhanizadeh, B. In Proceedings of the Annual Conference Canadian Society for Civil Engineering. Montreal, QC, Canada. 11-15 June, 2019. URL: [csce2019.ca/](http://csce2019.ca/).
6. Yemelyanov D.I., Ponyavina N.A., Klovov I.A. Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2024. №2 (62). pp. 63-69.
7. Emel'yanov D.I., Ponyavina N.A., Klovov I.A., Andreeva K.A. Stroitel'noe proizvodstvo. Nauchno-texnicheskij zhurnal. 2020. № 4. pp. 51-57.
8. Francis, A. Frontiers in Built Environment. 2019. № 5. doi: 10.3389/fbuil.2019.00036.
9. Lim A.W.P., Latief Y. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. 2020. № 17 (2–3), pp. 1402–1413. doi: 10.1166/jctn.2020.8818.
10. Chen L., Lu Q., Li S., He W., Yang J. Journal of Management in Engineering. 2021. № 37 (2). doi: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000884.
11. Liu D., Li H., Wang H., Qi C., Rose T. Expert Systems with Applications. 2020. № 148. doi: 10.1016/j.eswa.2020.113230.
12. Ginzburg A.V. Vestnik MGSU. Nauchno-texnicheskij zhurnal po stroitel'stvu i arxitekture. 2010. №4-1. pp. 251-255.
13. Novoselova I.V., Al'-Fatla A.N.M., Daxnova T.M., Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2022/7923](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2022/7923).
14. Titarenko B., Hasnaoui A., Titarenko R. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. Issue. 4. Art. № 42019.
15. Biruk S., Jaśkowski P. Applied Sciences (Switzerland). 2020. № 10 (22), pp. 1–14. doi: 10.3390/app10228028.

**Дата поступления: 9.03.2025**

**Дата публикации: 25.04.2025**