



Проектирование разноритмичных строительных потоков на основе модификации метода критического пути

Ю.П. Тихонов

Государственный университет управления, Москва

Аннотация: В статье рассмотрены основные положения используемого в зарубежной практике календарного планирования поточных строительных проектов комбинированного метода, объединяющего в себе метод критического пути и метод «линий баланса». Приведен соответствующий ему алгоритм расчета параметров разноритмичных строительных потоков на основе данных о продолжительности работ критического пути в рамках одного частного фронта работ (захватки) и директивного срока выполнения всего проекта. Обозначены основные недостатки этого метода и возможные пути их решения. Представлены особенности модификации данного метода с параллельной работой бригад на нескольких захватках в рамках циклов. Описан способ увязки смежных работ, выполняемых бригадами в циклах, – метод «дельта-смещения». В заключении дана оценка возможности применения данного метода при проектировании разноритмичных потоков в отечественной практике календарного планирования строительных проектов.

Ключевые слова: организация строительства, календарное планирование, строительный поток, фронт работ, захватка, циклограмма, сетевой график, метод критического пути, метод «линий баланса», метод «дельта-смещения».

Проекты поточного строительства, реконструкции и капитального ремонта зданий и сооружений широко распространены как в России, так и за рубежом. Поточный метод организации строительного производства часто используется при возведении различных линейных объектов [1], высотных зданий и жилых комплексов, а также в случае реконструкции и капитального ремонта уже существующих объектов и их комплексов. Формирование потоков является одним из ключевых и основных процессов в организации и планировании строительства [2].

С начала 1960-х годов в качестве основного метода календарного планирования строительных проектов используется метод критического пути (*critical path method – CPM*), получивший известность в нашей стране как метод сетевого планирования и управления. Применительно к поточным проектам им не предусмотрена возможность обеспечения непрерывности работы бригад и визуализации большого объема данных календарного плана,

связанного с различиями в ритмах работ и движением бригад по частным фронтам работ (захваткам). В то же время, формирование потоков и создание сетевых моделей взаимно дополняют друг друга в рамках планирования строительного производства [3]. Поэтому в целях успешного календарного планирования поточных проектов метод критического пути был объединен с методом «линии баланса» (*line of balance – LOB*) – графическим методом проектирования потоков с формированием организационно-технологической модели, сочетающей в себе элементы циклограммы и линейного графика. Метод, объединяющий в себе *CPM* и *LOB*, был представлен в 1994 г. в работе [4] и впоследствии совершенствовался, в том числе в трудах исследователей из Университета Уотерлу в Канаде под руководством профессора Т. Хегази, начиная с работы [5]. Этот комбинированный метод представляет значительный интерес для проектирования разноритмичных потоков. Рассмотрим алгоритм метода, скорректировав его некоторые положения в соответствии с терминологией и моделями поточной организации строительного производства, используемыми в отечественной практике.

1. Сначала для одной (первой) захватки рассчитываются ключевые параметры сетевого графика – ранние и поздние начала и окончания работ, их общие и частные резервы. Наиболее удобным способом такого расчета представляется известный табличный метод [6].

2. Далее приступают к расчету параметров потоков, обеспечивающих соблюдение директивного срока реализации проекта (рис. 1).

Зная, сколько времени требуется для выполнения всех работ на одной захватке (продолжительность критического пути на ней) T_1 , можно найти время, необходимое для завершения оставшихся $m-1$ захваток, и рассчитать требуемый для соблюдения директивного срока T_D темп их прохождения v :

$$v = \frac{\text{оставшиеся захватки}}{\text{оставшееся время}} = \frac{m-1}{T_D - T_1}. \quad (1)$$

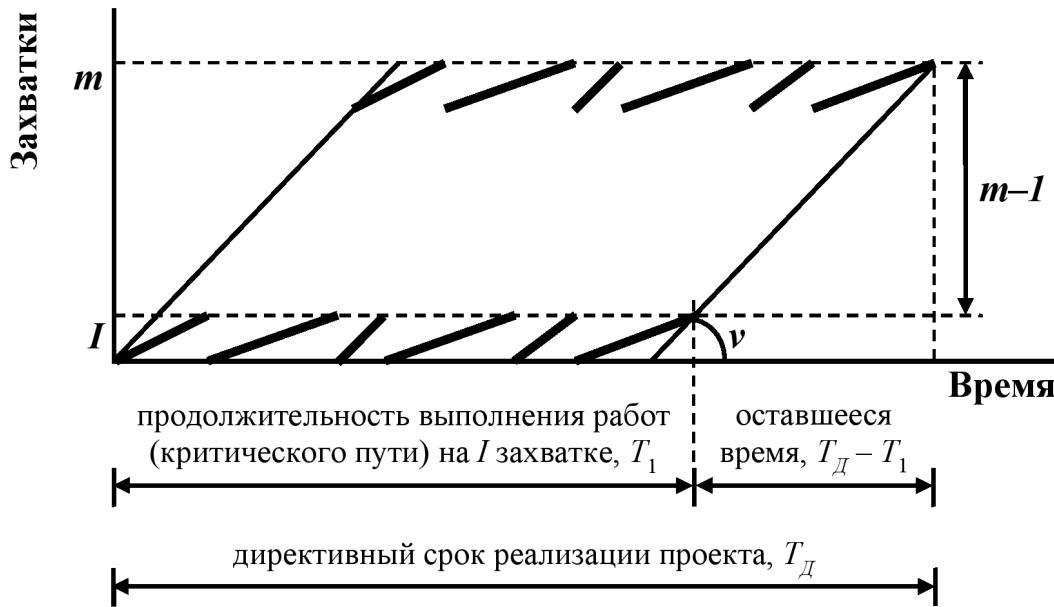


Рис. 1. – Расчет требуемого темпа прохождения захваток v

Рассчитав требуемый темп прохождения захваток v , можно применить его ко всем критическим работам, чтобы уложиться в директивный срок. При этом некритические работы можно «ослабить», задавая им более медленный темп прохождения захваток в соответствии с их общими резервами. Таким образом, темп прохождения захваток j -ой работой, необходимый для сбалансированного использования ресурсов, определяется следующим образом:

$$v_j = \frac{m-1}{T_d - T_1 + R_j}, \quad (2)$$

где R_j – общий резерв j -ой работы.

Формула (2) учитывает при определении темпа прохождения захваток расчет резервов в методе критического пути и может применяться как к критическим, так и к некритическим работам. У критических работ общие резервы равны нулю, поэтому применительно к ним формула (2) упрощается до формулы (1).

3. После расчета требуемого темпа прохождения захваток рассчитывается количество бригад, необходимое для достижения этого темпа, с учетом непрерывности и синхронности их работы.

На рис. 2 для выполнения работы, повторяющейся на пяти захватках, задействованы три бригады ($B1$, $B2$ и $B3$). Предполагается, что только одна бригада на одной захватке выполняет работу вплоть до ее завершения и затем сразу переходит на другую захватку [7].

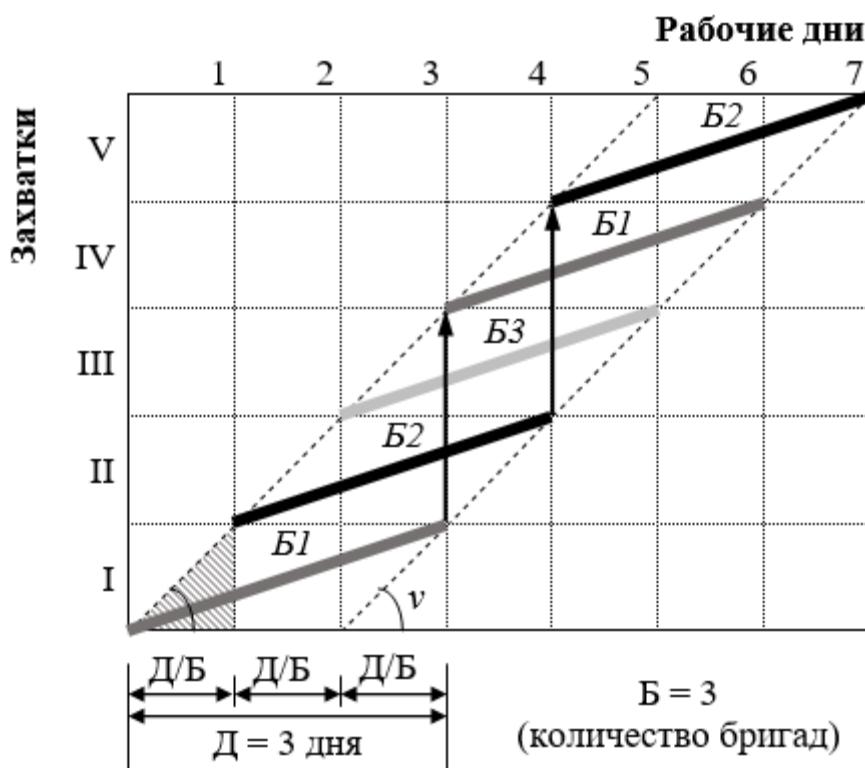


Рис. 2. – Движение бригад по захваткам на циклограмме потока

Отношение продолжительности выполнения j -ой работы D_j к количеству задействованных на ней бригад B_j означает, что каждая бригада приступает к работе на захватке через некоторое время, равное D_j/B_j , от начала работ на предыдущей захватке. Следовательно, формула определения темпа прохождения захваток v_j , который обеспечивает непрерывную работу бригад, может быть представлена следующим образом:

$$v_j = \frac{1}{\Delta_j / B_j} = \frac{B_j}{\Delta_j}, \quad (3)$$

где v_j – темп прохождения захваток j -ой работой, равный тангенсу угла заштрихованного треугольника на рис. 2.

Отсюда следует, что:

$$B_j = v_j \times \Delta_j. \quad (4)$$

Количество бригад B_j , рассчитанное по формуле (4), по сути, обеспечивает выполнение критических работ с таким темпом v_j , который гарантирует соблюдение директивного срока выполнения всего проекта. Однако важно учитывать, что в большинстве случаев количество бригад, рассчитанное по формуле (4), не является целым числом. Поэтому количество задействованных бригад необходимо скорректировать, округлив вверх до целого числа. Также необходимо принимать во внимание, что бригад, имеющихся в распоряжении, иногда меньше, чем требуется по результатам расчета. В этом случае фактическое количество задействованных бригад должно быть ограничено их предельным возможным количеством B_j^{pred} . Таким образом, фактическое количество бригад B_j^ϕ , задействованных на j -ой работе, определяется так:

$$B_j^\phi = \lceil B_j \rceil, \quad B_j^\phi \leq B_j^{pred}. \quad (5)$$

Следовательно, фактический темп прохождения захваток каждой j -ой работой v_j^ϕ определяется на основе фактического количества бригад B_j^ϕ следующим образом:

$$v_j^\phi = \frac{B_j^\phi}{\Delta_j}. \quad (6)$$

После определения количества задействованных бригад можно рассчитать время начала и окончания всех работ на захватках [8]. Следует отметить, что всякий раз, когда в исходное количество бригад, рассчитанное по формуле (4), вносятся изменения либо из-за округления, либо из-за

нехватки трудовых ресурсов, пересчитанные по формулам (5) и (6) количество бригад и темп прохождения захваток больше не обеспечивают непрерывность работы или синхронность бригад, а также не гарантируют соблюдение директивного срока выполнения всего проекта.

Рассмотрим последствия округления количества бригад [5]. На рис. 3а изображен исходный график для простой сети из четырех работ до округления количества участников. Работы A , B и B являются критическими, а работа Γ выполняется параллельно с работой B и имеет общий резерв, который применяется в формуле (2). Округление количества бригад в некоторых критических работах может привести к тому, что они будут выполняться быстрее, чем остальные, что, в свою очередь, приведет к задержке сроков реализации всего проекта. Это показано на рис. 3б, где ускорено выполнение критической работы B . Задержка произошла из-за того, что пришлось сдвинуть начало работы B на первой захватке, чтобы корректно увязать ее с работой B .

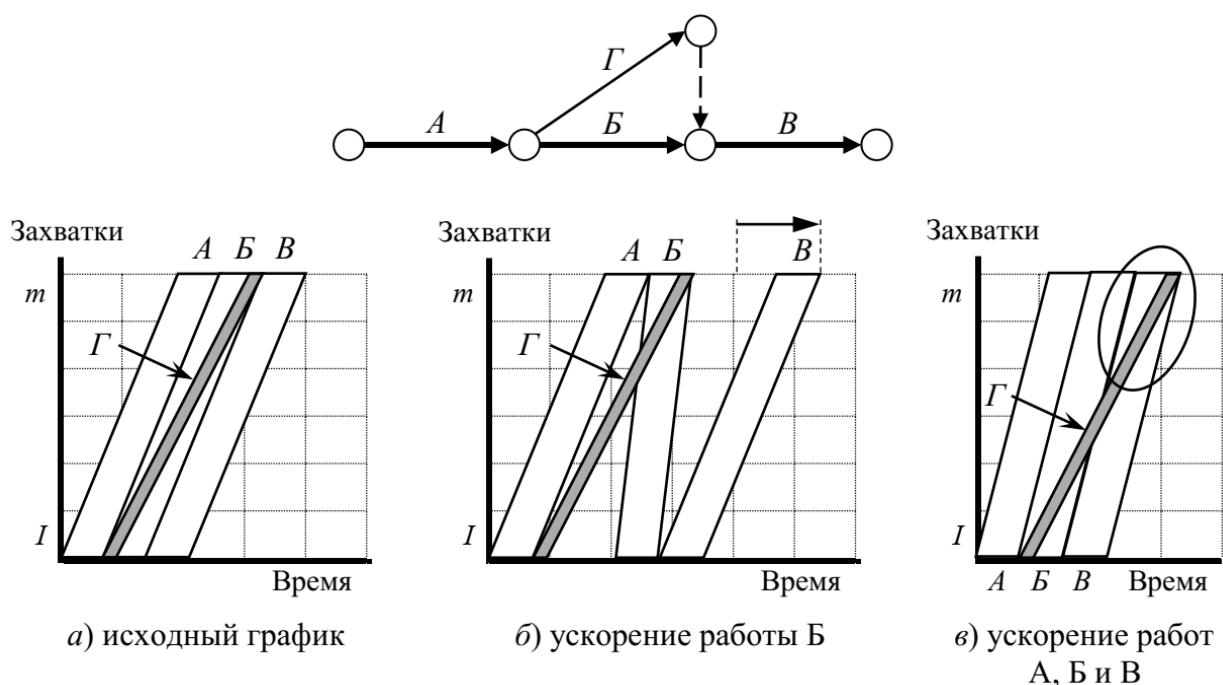


Рис. 3. – Последствия ускорения критических работ [5]

Кроме того, ослабление некритических работ в некоторых случаях может привести к нарушению логических взаимосвязей на последних захватках. Пример такой ситуации показан на рис. 3в, где темп прохождения захваток критическими работами A , B и B увеличен из-за округления количества бригад, в то время как некритическая работа Γ остается в неизменном виде.

Таким образом, в работе [5] делается вывод, что ослабление некритических работ посредством использования их общих резервов является чрезмерным и может привести к нарушению логических взаимосвязей на последних захватках, если только в график не будет внесена корректировка посредством либо задержки работы B , либо увеличения темпа прохождения захваток работой Γ . Ускорение работы Γ в таких случаях более предпочтительно, поскольку не приведет к задержке выполнения всего проекта. Целесообразно заменить общий резерв в формуле (2) на частный:

$$v_j = \frac{m-1}{T_{\Delta} - T_1 + r_j}, \quad (7)$$

где r_j – частный резерв j -ой работы [5].

При ограниченности трудовых ресурсов для выполнения некоторых работ вынужденно приходится ставить меньшее количество бригад, что приводит к снижению темпов прохождения захваток. В этом случае либо будет задерживаться весь график, либо нарушаться логика, как было показано ранее. С другой стороны, целесообразно подробно рассмотреть работы, в которых по итогу задействовано больше бригад, чем определено расчетами, чтобы определить, повлияет ли использование некоторых или всех дополнительных бригад (т.е. ускорение этих работ) на общие затраты и продолжительность выполнения проекта. При любых изменениях в ресурсах, используемых в работах, фактический темп прохождения захваток может быть рассчитан с помощью формулы (6).

Основой для расчетов в комбинированном методе на основе *CPM* и *LOB* являются приведенные выше формулы (3–7). Следует заметить, что, хотя все они просты и систематизированы, у них есть серьезный недостаток. Например, в случае если темп прохождения захваток v_j равен 2 захваткам в день, то работа j на каждой захватке начинается через время, равное $1/v_j$, после предыдущей захватки, т.е. через 0,5 дня после предыдущей захватки. Если такое нецелое исходное значение округлить в большую сторону, это приведет к задержкам на каждой захватке, которые увеличиваются до значительных масштабов при большом количестве захваток. Кроме того, в классическом варианте метода бригады начинают работы со смещением во времени по отношению к бригаде на предшествующей захватке, что не имеет особого смысла, за исключением удобства расчетов. Таким образом, описанные выше расчеты приводят лишь к приблизительному, а не точному графику, которого можно смело придерживаться.

Впоследствии научной школой Т. Хегази из Университета Уотерлу в Канаде была разработана новая методика расчета необходимого количества бригад для более практически целесообразного случая использования параллельно работающих бригад [9].

Для выполнения всех работ в срок на каждой из них необходимо обеспечить требуемый темп прохождения захваток v . Графически на циклограмме линия, отображающая требуемый темп прохождения захваток любой работой, параллельна линии требуемого темпа прохождения захваток у всего проекта, т.к. имеет тот же угол наклона по отношению к шкале времени. Бригады рабочих, выполняющие работу j ($j = 1\dots n$) на каждой из m захваток, распределяются на Π циклов работы по B бригад в каждом для достижения этого темпа. Необходимо рассчитать количество параллельно работающих бригад B_j в цикле для выполнения ими работы j . Например, если $B_j = 3$, то в первом цикле работы три бригады сначала распределяются по

захваткам номер один, два и три. Далее они переходят на четвертую, пятую и шестую захватки во втором цикле, а затем – на седьмую, восьмую и девятую захватки в третьем цикле и т.д.

Поскольку бригада, выполняющая работу на первой захватке, входит в первый цикл работы бригад, все остальные циклы должны укладываться в величину $(T_D - T_1)$, т.е. выполняется равенство:

$$(I_{ucx} - 1) \times D_j = T_D - T_1, \quad (8)$$

где I_{ucx} – исходное число циклов работы бригад.

Из вышеизложенного следует, что

$$I_{ucx} = \frac{T_D - T_1}{D_j} + 1. \quad (9)$$

Требуемое количество бригад B_j для выполнения j -ой работы рассчитывается как отношение количества захваток и исходного числа циклов работы бригад, округляемое вверх:

$$B_j = \left\lceil \frac{m}{I_{ucx}} \right\rceil. \quad (10)$$

При этом количество бригад B_j не должно превышать количество захваток m , т.к. в таком случае поток не устанавливается [10], а также предельно возможное количество бригад B_j^{pred} .

$$1 \leq B_j \leq m, \quad (11)$$

$$B_j \leq B_j^{pred}. \quad (12)$$

Рассчитав требуемое количество бригад, можно определить фактическое количество циклов работы бригад I_j в рамках j -ой работы:

$$I_j = \left\lceil \frac{m}{B_j} \right\rceil. \quad (13)$$

Главное преимущество описанного подхода заключается в том, что в нем допускаются нецелочисленные значения времени начала работы бригад.

Кроме того, график можно уплотнять, рассматривая циклы работы бригад как элементы игры «Тетрис», чтобы все работы выполнялись максимально синхронно и укладывались в установленные сроки [9].

После расчета требуемого количества бригад на всех работах, можно приступить к увязке смежных работ. Расчет ведется, как обычно, начиная с самых первых работ, у которых нет предшествующих.

Для увязки смежных работ, которые могут иметь совершенно разные ритмы, количество бригад и циклов их работы, используется метод «дельта-смещения» [9]. На каждой i -ой захватке рассчитывается разница между наибольшим из окончаний всех предшествующих работе j работ O_{j-1}^i и началом выполнения j -ой работы на этой захватке H_j^i , если бы она стартовала одновременно с предшествующей:

$$\Delta_i = O_{j-1}^i - H_j^i = \left\lceil \frac{i}{B_{j-1}} \right\rceil \times \Delta_{j-1} - \left(\left\lceil \frac{i}{B_j} \right\rceil - 1 \right) \times \Delta_j, \quad (14)$$

где Δ_{j-1} – продолжительность выполнения предшествующей работы на максимальном пути; Δ_j – продолжительность выполнения j -ой работы.

Далее из всех полученных значений выбирается наибольшее:

$$\Delta_{cm} = \max \Delta_i. \quad (15)$$

Оно указывает на критическую захватку (захватку, на которой последующая работа начинается без задержки при непрерывном ее выполнении на всех других захватках) и называется «дельта-смещением». Добавляя это значение к времени начала выполнения предшествующей работы на максимальном пути на первой захватке, можно найти начало j -ой работы на первой захватке. Как отмечают авторы, метод «дельта-смещения» является универсальным и чрезвычайно полезным при планировании последовательно выполняемых работ без нарушения логических связей между ними на какой-либо захватке, даже в случае неритмичных потоков [9].

Рассмотренный выше комбинированный метод на основе *CPM* и *LOB*, несмотря на имеющиеся недостатки, позволяет достаточно эффективно планировать разноритмичные комплексные потоки по строительству, реконструкции и капитальному ремонту зданий и сооружений на основе данных о продолжительности работ критического пути в рамках одного объекта и директивного срока выполнения всего поточного проекта. Случаи неритмичных потоков с критическим путем требуют более сложных расчетов, но некоторые положения данного метода применимы и для них. Особого внимания заслуживает метод «дельта-смещения», позволяющий увязывать смежные работы друг с другом без нарушения их логических связей на захватках или объектах, а также организация работы бригад в циклах, обеспечивающее их параллельную работу на захватках или объектах без смещения во времени.

Литература

1. Челнокова В.М. Совершенствование структуризации и взаимосвязи работ по созданию линейных объектов на основе комплексных потоков // Инженерный вестник Дона. 2022. № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7618.
 2. Кужин М.Ф., Галеева Р.Г. Организация и планирование строительного производства при возведении комплексов зданий и сооружений // Инженерный вестник Дона. 2021. № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/6955.
 3. Бовтеев С.В. Расчет параметров поточной организации работ методом критического пути // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 3. С. 90-97. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-3-90-97.
 4. Suhail S.A., Neale R.H. CPM/LOB: New Methodology to Integrate CPM and Line of Balance // Journal of Construction Engineering and Management.
-

1994. Vol. 120, No. 3. P. 667-684. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(1994)120:3(667).

5. Hegazy T., Wassef N. Cost Optimization in Projects with Repetitive Nonserial Activities // Journal of Construction Engineering and Management. 2001. Vol. 127, No. 3. pp. 183-191. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2001)127:3(183).

6. Король С.П., Король Р.А. Алгоритмический подход в сетевом моделировании в строительстве: графические решения и оптимизационные задачи // Жилищные стратегии. 2023. Т. 10. № 3. С. 317-332. DOI: 10.18334/zhs.10.3.118842.

7. Ammar M. LOB and CPM Integrated Method for Scheduling Repetitive Projects // Journal of Construction Engineering and Management. 2013. Vol. 139, No. 1. pp. 44-50. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000569.

8. Hegazy T., Kamarah E. Efficient Repetitive Scheduling for High-Rise Construction // Journal of Construction Engineering and Management. 2008. Vol. 134, No. 4. P. 253-264. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:4(253).

9. Hegazy T., Saad D.A., Mostafa K. Enhanced Repetitive-Scheduling Computation and Visualization // Journal of Construction Engineering and Management. 2020. Vol. 146, No. 10. P. 04020118. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001911.

10. Шеина С.Г., Мищенко В.Я., Сергеев Ю.Д., Мясищев Р.Ю., Сергеева А.Ю. Организационно-технологические решения установления взаимосвязей между параметрами строительного потока при разбивке общего фронта работ // Инженерный вестник Дона. 2025. № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2025/10054.

References

1. Chelnokova V.M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, No. 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7618.

2. Kuzhin M.F., Galeyeva R.G. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, No. 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/6955.
3. Bovtayev S.V. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov, 2018, No. 3, pp. 90-97. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-3-90-97.
4. Suhail S.A., Neale R.H. Journal of Construction Engineering and Management, 1994, Vol. 120, No. 3, pp. 667-684. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(1994)120:3(667).
5. Hegazy T., Wassef N. Journal of Construction Engineering and Management, 2001, Vol. 127, No. 3, pp. 183-191. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2001)127:3(183).
6. Korol' S.P., Korol' R.A. Zhilishchnye strategii, 2023, Vol. 10, No. 3, pp. 317-332. DOI: 10.18334/zhs.10.3.118842.
7. Ammar M. Journal of Construction Engineering and Management, 2013, Vol. 139, No. 1, pp. 44-50. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000569.
8. Hegazy T., Kamarah E. Journal of Construction Engineering and Management, 2008, Vol. 134, No. 4, pp. 253-264. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:4(253).
9. Hegazy T., Saad D.A., Mostafa K. Journal of Construction Engineering and Management, 2020, Vol. 146, No. 10, p. 04020118. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001911.
10. Sheina S.G., Mishchenko V.Ya., Sergeyev Yu.D., Myasishchev R.Yu., Sergeyeva A.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona, 2025, No. 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2025/10054.

Дата поступления: 13.11.2025

Дата публикации: 25.12.2025