



2025. 4(12). 57–71

ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ

REINFORCED CONCRETE STRUCTURES (ZHELEZOBETONNNYE KONSTRUKTSII)

ISSN 2949-1622 (PRINT)

ISSN 2949-1614 (ONLINE)

HTTP://G-B-K.RU

УДК 624.012.4

DOI: 10.22227/2949-1622.2025.4.57-71

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH ARTICLE

## Функционально-стоимостной анализ железобетонных работ

**А.Х. Байбурин\*, Н.В. Кочарин***Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Российская Федерация*

\* abayburin@mail.ru

**Ключевые слова:** строительные технологии, железобетонные работы, технологические операции, функционально-стоимостной анализ, нежелательные эффекты

**История статьи**

Поступила в редакцию: 21.10.2025

Доработана: 01.11.2025

Принята к публикации: 07.11.2025

**Для цитирования**

Байбурин А.Х., Кочарин Н.В. Функционально-стоимостной анализ железобетонных работ // Железобетонные конструкции. 2025. Т. 12. № 4. С. 57–71.

**Аннотация.** Среди методов совершенствования технологических процессов наиболее эффективным является функционально-стоимостной анализ (ФСА). В статье приведены основные результаты ФСА процесса железобетонных работ. Цель исследования: выполнить морфологический, структурный и функциональный анализ, оценить затраты и определить недостатки операций, составляющих исследуемый процесс. На первом этапе построена морфологическая классификация технологии железобетонных работ, охватывающая множество вариантов технологии. Выполнен предварительный анализ известных технологий. На основе ФСА традиционной технологии определены ее функции и ранги операций, их недостатки, приоритеты свертывания. Показано, что выявление причинно-следственных связей недостатков существующей технологии позволяет выявить ключевые проблемы и уточнить приоритеты свертывания операций. Проведен сравнительный анализ альтернативных технологий скользящей и несъемной опалубки, торкретирования, 3D-печати, а также метода опускаемого бетона.

## Value Engineering Analysis of Concrete Work Process

**A.Kh. Bayburin\*, N.V. Kocharin***South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russian Federation*

\* abayburin@mail.ru

**Альберт Халимович Байбурин**, доктор технических наук, профессор кафедры строительного производства и теории сооружений, Южно-Уральский государственный университет (НИУ), 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76; SPIN-код: 5927-9812, AuthorID: 266980, ORCID: 0000-0002-7432-5671, E-mail: abayburin@mail.ru

**Николай Витальевич Кочарин**, старший преподаватель кафедры строительного производства и теории сооружений, Южно-Уральский государственный университет (НИУ), 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76; E-mail: kocharin@usu.ru

© Байбурин А.Х., Кочарин Н.В., 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

**Keywords:** construction techniques, reinforced concrete work, technological processes, value engineering analysis, undesired effects

#### Article history

Received: 21.10.2025

Revised: 01.11.2025

Accepted: 07.11.2025

#### For citation

Bayburin A.Kh., Kocharin N.V. Value Engineering Analysis of Concrete Work Process. *Reinforced concrete structures*. 2025; 4(12):57-71.

**Abstract.** Among the methods for improving technological processes, the Value Engineering Analysis (VEA) is the most effective. This article presents the main results of an VEA analysis of the concrete works process. The purpose of the study is to conduct a morphological, structural, and functional analysis of the process, evaluate costs, and identify areas for improvement. At the first stage, a morphological classification of reinforced concrete technology was created, covering various options for the technology. A preliminary analysis of existing technologies has been conducted. Based on the VEA of traditional technology, the functions, ranks, disadvantages, and priorities of operations have been identified.

It has been shown that by identifying the cause-and-effect relationships between the shortcomings of existing technology, key problems can be identified and priorities for improving operations can be clarified. A comparative analysis of various technologies for sliding and non-removable forms, shotcrete, 3D printing, and the method of low-lying concrete is conducted.

## ВВЕДЕНИЕ

Функционально-стоимостной анализ (ФСА) — это метод системного исследования функций изделия, производственного процесса, организационной структуры, услуги. Цель ФСА: повышение эффективности использования ресурсов путем оптимизации соотношения между потребительскими функциями объекта и затратами на его разработку, производство и эксплуатацию. Основы ФСА положили работы авиаконструктора Р.Л. Бартини, инженера Пермского телефонного завода Ю.М. Соболева (поэлементный экономический анализ, ПЭА) и американца Л.Д. Майлса, инженера General Electric (value analysis/value engineering, VA/VE) [1–3]. В США применяется термин Value engineering analysis — стоимостной инженерный анализ [4]. Метод стандартизирован Обществом американских инженеров по оценке стоимости, и его проведение является условием получения крупных государственных заказов [5].

Практика ФСА получила большое развитие в 1980-е гг. в СССР в различных отраслях промышленности. При этом особое внимание обращалось на совершенствование технологических процессов [2, 3]. В этот период вышли основательные труды по теории ФСА, разработаны фундаментальные принципы, проверены на практике многочисленные приемы и методы по снижению затрат и повышению качества продукции. Особую эффективность показало совместное применение ФСА и ТРИЗ [6], которое было обусловлено не только постановкой задач, но и их решением.

В строительной сфере метод ФСА до сих пор не нашел широкого применения. Совершенствование строительных технологических процессов методом ФСА является актуальной задачей.

## МЕТОД

Методика проведения ФСА технологических процессов подробно описана в монографиях [2, 3] и учебном пособии [7]. Основные этапы ФСА: структурный анализ, формулирование и ранжирование функций, параметрический анализ, определение стоимости. Изложенный здесь материал рекомендуется к изучению совместно с результатами ФСА свайных работ [8].

**Albert Kh. Baiburin**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Construction Engineering and Structural Theory, South Ural State University (National Research University), 76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; SPIN-code: 5927-9812, AuthorID: 266980, ORCID: 0000-0002-7432-5671, E-mail: abayburin@mail.ru

**Nikolai V. Kocharin**, Senior Lecturer, Department of Construction Engineering and Structural Theory, South Ural State University (National Research University), 76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; E-mail: kocharin\_nv@susu.ru

Комплексный технологический процесс бетонных работ подразделяется на опалубочные, арматурные и бетонные. Основными операциями бетонных работ являются монтаж опалубки, установка арматуры, укладка и уплотнение бетонной смеси, устройство рабочих швов, уход за бетоном, демонтаж опалубки [9, 10]. В зимних условиях требуется сохранить воду в бетонной смеси в жидкой фазе, что требует применения специальных методов зимнего бетонирования. Развивая классификацию железобетонных монолитных технологий, проведем морфологический анализ по ряду существенных признаков.

1. Вид опалубки согласно ГОСТ 34329–2017: 1) мелкощитовая; 2) крупнощитовая; 3) блочная; 4) объемно-переставная; 5) скользящая; 6) катучая; 7) подъемно-переставная; 8) пневматическая; 9) несъемная; 10) без опалубки.

2. Вид армирования по ГОСТ Р 57997–2017: 1) отдельные стержни; 2) плоские сетки; 3) каркасы; 4) фибра; 5) прокатные профили, трубы; 6) комбинированное; 7) без армирования.

3. Вид бетона согласно ГОСТ 25192–2012, ГОСТ Р 57345–2016: 1) тяжелый; 2) мелкозернистый; 3) легкий; 4) ячеистый; 5) силикатный; 6) жаростойкий; 7) химически стойкий; 8) специальный (особо тяжелый, напрягающий и т.д.).

4. Вид добавки в бетонную смесь по ГОСТ 24211–2008: 1) минеральная; 2) пластифицирующая; 3) водоредуцирующая; 4) стабилизирующая; 5) воздухововлекающая; 6) противоморозная; 7) гидрофобизирующая; 8) ускорители и замедлители твердения; 9) специальная; 10) без добавок.

5. Способ подачи бетонной смеси: 1) кран с бункером; 2) бетононасос; 3) пневмонагнетатель; 4) бетоноукладчик; 5) виброжелоб; 6) бетонолитная труба или полый буровой став; 7) свободное сбрасывание.

6. Способ укладки бетонной смеси: 1) с уплотнением; 2) литьем; 3) напорный (восходящего раствора); 4) втапливание крупного заполнителя в раствор или наоборот («изюм»).

7. Способ уплотнения материала: 1) вибрация; 2) трамбование (укладка); 3) гидравлическое прессование; 4) пневматическое прессование; 5) без уплотнения (самоуплотняющиеся смеси).

8. Метод зимнего бетонирования: 1) тепляк; 2) термос; 3) греющая опалубка; 4) греющие провода; 5) электропрогрев; 6) предварительный электроразогрев; 7) индукционный прогрев; 8) инфракрасный нагрев; 9) противоморозные добавки; 10) комбинированный.

Морфологическая классификация технологий бетонных работ охватывает теоретически  $10 \times 7 \times 8 \times 10 \times 7 \times 4 \times 5 = 784\,000$  вариантов (без учета методов зимнего бетонирования). Например, традиционная технология возведения зданий из монолитного тяжелого бетона имеет следующую спецификацию: А2Б3В1Г2Д2Е1Ж1, а специальная технология торкретбетона — А10Б3В2Г4Д3Е1Ж3.

Из анализа литературы и результатов авторских производственных исследований [38] выявлены недостатки различных технологий устройства монолитных железобетонных конструкций (табл. 1).

Недостатки и потенциальные нежелательные эффекты, указанные в таблице:

1. Расслоение, остывание или схватывание бетонной смеси.
2. Сдвиг или протечки опалубки.
3. Смещение арматуры от проектного положения.
4. Недостаточное уплотнение бетонной смеси.
5. Нарушения в устройстве технологических швов.
6. Замораживание свежеуложенной бетонной смеси.
7. Неплотности, раковины и другие дефекты бетона.
8. Низкая производительность.

**Таблица 1 / Table 1**

Недостатки технологий устройства монолитных конструкций  
Disadvantages of Cast-in-Place Concrete Construction Technologies

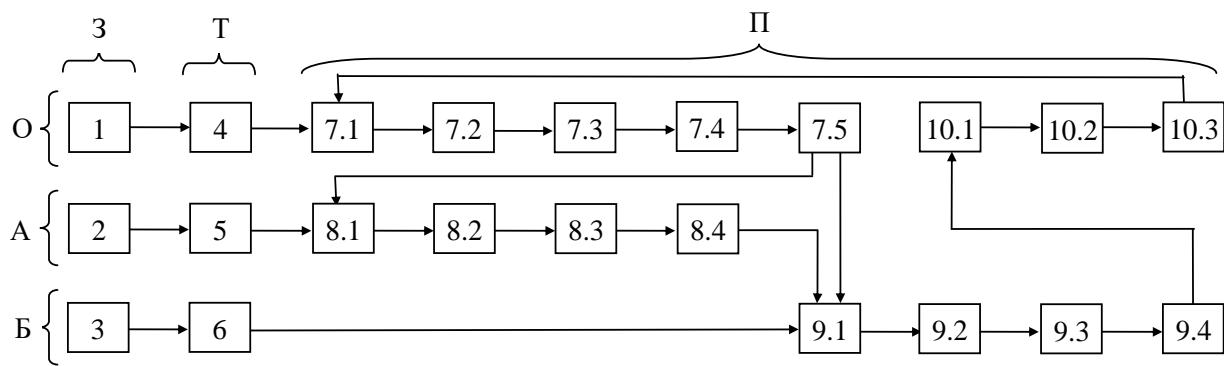
Технология Technology	Классификатор (см. выше) Classification	Номер нежелательного эффекта Number of undesired effect							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Кран с бункером with bucket (hopper)	A2Б3В1Г2Д1Е1Ж1	-	±	±	-	-	-	±	+
Бетононасос Concrete pump	A2Б3В2Г2Д2Е2Ж5	-	±	±	-	-	-	±	-
Торкрет Shotcrete (guniting)	A10Б3В2Г4Д3Е1Ж3	+	-	±	-	-	+	-	+
Бетоноукладчик Concrete spreader	A1Б3В1Г2Д4Е1Ж1	+	±	±	-	-	+	±	±
Виброжелоб Vibrating chute	A1Б1В1Г2Д5Е1Ж1	+	±	±	-	-	+	±	-
Напорная (сваи) Press-in piling (piles)	A10Б3В1Г2Д6Е3Ж1	-	-	±	±	-	-	±	-
Укладка (дороги) Pavement laying (roads)	A10Б2В1Г1Д4Е1Ж2	+	-	-	-	-	+	-	-
3D-печать / 3D printing	A10Б4В2Г4Д2Е2Ж5	+	-	-	-	±	+	-	+

В табл. 1 указаны не все известные недостатки, более подробный анализ будет проведен в подразделе, посвященном анализу нежелательных эффектов традиционной технологии железобетонных работ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Построение структурной модели

Структурная модель технологического процесса с разделением на операции показана на рис. 1. Конечно, построенная модель не может соответствовать всем конкретным случаям. Так, например, арматурные работы могут опережать опалубочные или вестись параллельно с ними. Нужно стремиться к тому, чтобы модель процесса максимально точно отображала состав операций и связи между ними.

**Рис. 1.** Структурная модель процесса железобетонных работ:

виды работ (операций): 3 — заготовительные; Т — транспортные; П — построочные; О — опалубочные; А — арматурные; Б — бетонные; 1 — изготовление опалубки; 2 — заготовка арматуры; 3 — изготовление бетонной смеси; 4 — транспортирование опалубки; 5 — транспортирование арматуры; 6 — транспортирование бетонной смеси; 7.1 — чистка опалубки; 7.2 — смазка опалубки; 7.3 — монтаж (сборка) опалубки; 7.4 — выверка опалубки; 7.5 — закрепление опалубки; 8.1 — установка арматуры; 8.2 — выверка арматуры; 8.3 — вязка (сварка) арматуры; 8.4 — закрепление арматуры с фиксацией защитного слоя; 9.1 — укладка бетонной смеси; 9.2 — уплотнение бетонной смеси; 9.3 — устройство рабочих швов; 9.4 — уход за бетоном; 10.1 — раскрепление опалубки; 10.2 — отделение опалубки от бетона; 10.3 — снятие опалубки

**Fig. 1.** Structural model of the reinforced concrete work process:

types of work (operations): F — Fabrication; T — Transportation; OS — On-site; FW — Formwork; R — Reinforcement; C — Concrete; 1 — formwork manufacturing; 2 — reinforcement fabrication; 3 — concrete mix production; 4 — formwork transportation; 5 — reinforcement transportation; 6 — concrete mix transportation; 7.1 — formwork cleaning; 7.2 — formwork oiling; 7.3 — formwork erection (assembly); 7.4 — formwork alignment; 7.5 — formwork securing; 8.1 — reinforcement placement; 8.2 — reinforcement alignment; 8.3 — reinforcement tying (welding); 8.4 — reinforcement securing with protective layer fixing; 9.1 — concrete mix placement; 9.2 — concrete mix compaction; 9.3 — construction joint forming; 9.4 — concrete curing; 10.1 — formwork unsecuring; 10.2 — formwork separation from concrete; 10.3 — formwork removal

### Параметрический анализ

Для определения ресурса выполнения функций каждой операции выполнен анализ параметров выполнения этих функций (табл. 2). Для установления требуемых параметров были использованы действующие нормы.

**Таблица 2**  
Параметрический анализ технологического процесса (фрагмент)

Функция (операция)	Норма	Значение параметра		Ресурс функции
		Допуск	Факт	
7.3. Монтаж опалубки	СП 70.13330, п. 5.17, табл. 5.11	Положение, прогиб	Соответствует	А
8.1. Установка арматуры	СП 70, п. 5.16, табл. 5.10	Положение, защитный слой	Соответствует (меньше)	A(H)
8.3. Вязка арматуры	Проект, ППР	Шаг узлов	Соответствует (меньше)	A(H)
9.1. Укладка бетонной смеси	СП 70.13330, табл. 5.2	Высота сбрасывания 1,0–4,5 м	Соответствует	А
9.2. Уплотнение бетонной смеси	СП 70.13330, пп. 5.3.8, 5.3.10, табл. 5.2	$b \leq 1,5R_{\text{вib}}$ ; $h \leq 1,25L_{\text{вib}}$ ; $h \leq 12\text{--}25 \text{ см}$	Соответствует (больше)	A(H)
9.3. Устройство рабочих швов	СП 70.13330, пп. 5.3.1, 5.3.12	$R_b \geq 1,5 \text{ МПа}$ , положение шва, удаление пленки	Соответствует или нет	A(H)
9.4. Уход за бетоном	СП 70.13330, п. 5.4.1	Температура, влажность, срок	Соответствует (меньше)	A(H)

Примечания:

- СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции.

2. Обозначения:  $h$  — толщина слоя;  $b$  — шаг перестановки вибратора;  $R_{\text{вib}}$ ,  $L_{\text{вib}}$  — радиус действия и длина глубинного вибратора;  $R_b$  — прочность бетона.  
 3. При зимнем бетонировании необходимо обеспечить дополнительные параметры, указанные в табл. 5.7 СП 70.13330–2012.

**Table 2**  
Parametric Analysis of the Technological Process (fragment)

Function (Operation)	Standard (Norm)	Parameter Value		Function (Operation)
		Tolerance	Actual	
7.3. Formwork Erection (Assembly)	SP 70.13330, c. 5.17, Table 5.11	Position, deflection	Conforms	A
8.1. Reinforcement Placement	SP 70, c. 5.16, Table 5.10	Position, concrete cover	Conforms (less)	A(H)
8.3. Reinforcement Tying	Project, Construction Plan (PPR)	Tie spacing	Conforms (less)	A(H)
9.1. Concrete Mix Placement	SP 70.13330, Table 5.2	Drop height 1.0–4.5 m	Conforms	A
9.2. Concrete Mix Compaction	SP 70.13330, cs. 5.3.8, 5.3.10, Table 5.2	$b \leq 1.5R_{\text{vib}}$ ; $h \leq 1.25L_{\text{vib}}$ ; $h \leq 12\text{--}25 \text{ cm}$	Conforms (greater)	A(H)
9.3. Construction Joint Forming	SP 70.13330, cs. 5.3.1, 5.3.12	$R_b \geq 1.5 \text{ MPa}$ , Joint position, laitance removal	Conforms or not	A(H)
9.4. Concrete Curing	SP 70.13330, c. 5.4.1	Temperature, humidity, duration	Conforms (less)	A(H)

*Notes:*

1. SP 70.13330.2012. Load-Bearing and Enclosing Structures.
2. Symbols:  $h$  — layer thickness;  $b$  — vibrator repositioning step;  $R_{\text{vib}}$ ,  $L_{\text{vib}}$  — radius of action and length of an internal vibrator;  $R_b$  — concrete strength.
3. For winter concreting, it is necessary to ensure the additional parameters specified in Table 5.7 of SP 70.13330–2012.

Ресурс функции может быть адекватным (A); избыточным (И) или недостаточным (Н) в зависимости от того, достигаются ли заданные параметры. Все функции, как правило, характеризуются адекватным (A) уровнем выполнения. Однако операции установки и вязки арматуры, уплотнения бетонной смеси, устройства рабочих швов, ухода за бетоном характеризуются отклонениями от заданных параметров, поэтому уровень выполнения этих операций обозначен как A(H), т.е. имеется вероятность недостаточного уровня выполнения функции, что приводит к дефектам или отклонениям.

### Построение функциональной модели

При построении функциональной модели технологии использована классификация операций по виду: С — создающие (в результате этих операций что-то производится); О — обеспечивающие операции (транспортирование, хранение, погрузка – разгрузка, заготовка, подача и т.д.); И — исправляющие (в результате устраняется нежелательный эффект, возникший на предыдущих операциях); К — контрольно-измерительные операции; Т — транспортные операции; Пр — перерыв, простой.

Операции очистки, смазки опалубки и ее отрыва от бетона исправляют недостатки процесса, связанные с прилипанием бетона к опалубке. Свойство адгезии материала появляется после операции 9.4, когда бетонная смесь затвердевает в бетон.

К исправляющим также относятся операции выверки опалубки 7.4 и арматуры 8.2 (исправляются недостатки точности их установки), а также операция уплотнения бетонной смеси (удаление воздуха, попавшего в смесь на предыдущей операции 9.1).

Контрольные операции для контроля точности выверки, прочности закрепления, правильности укладки, уплотнения и ухода, а также прочности бетона в настоящей модели не рассматриваются. Они подразумеваются в составе каждой операции как ее заключительный этап.

В дальнейшем анализе заготовительные, транспортные операции рассматривать не будем. В табл. 3 приведен фрагмент функциональной модели производственного процесса.

**Таблица 3**

Функциональная модель процесса бетонных работ

Операция	Функция операции (F)	Вид операции	Ранг функции	Ресурс функции
7. Монтаж опалубки	F7.1. Очистить опалубку F7.2. Смазать опалубку F7.3. Установить опалубку (грубо) F7.4. Установить опалубку (точно) F7.5. Закрепить опалубку	И О С К О	ВФ ВФ ОФ ОФ ВФ	А А(И) А А А(Н)
8. Установка арматуры	F8.1. Установить арматуру (грубо) F8.2. Установить арматуру (точно) F8.3. Соединить арматурныестыки F8.4. Закрепить арматуру	С К С О	ОФ ОФ ОФ ВФ	А А А(Н) А(Н)
9. Укладка бетонной смеси	F9.1. Уложить смесь (в опалубку) F9.2. Удалить воздух (из смеси) F9.3. Изготовить рабочий шов F9.4. Укрыть (нагреть) бетон F9.5. Выдержать бетон	С И С О Пр	ОФ ВФ ВФ ВФ ОФ	А А(Н) А(Н) А(Н) А
10. Демонтаж опалубки	F10.1. Раскрепить опалубку F10.2. Отделить опалубку (от бетона) F10.3. Снять опалубку	О И С	ВФ ВФ ОФ	А А А

**Table 3**

Functional Model of the Concrete Work Process

Operation	Operation Function (F)	Operation Type	Function Rank	Function Resource
7. Formwork Erection	F7.1. Clean formwork F7.2. Oil formwork F7.3. Position formwork (rough) F7.4. Position formwork (precise) F7.5. Secure formwork	I O S K O	BF BF OF OF BF	A A(I) A A A(H)
8. Reinforcement Placement	F8.1. Position reinforcement (rough) F8.2. Position reinforcement (precise) F8.3. Connect reinforcement joints F8.4. Secure reinforcement	S K S O	OF OF OF BF	A A A(H) A(H)
9. Concrete Mix Placement	F9.1. Place mix (into formwork) F9.2. Remove air (from mix) F9.3. Form construction joint F9.4. Cover (heat) concrete F9.5. Cure concrete	S I S O Pr	OF BF BF BF OF	A A(H) A(H) A(H) A
10. Formwork Removal	F10.1. Unsecure formwork F10.2. Separate formwork (from concrete) F10.3. Remove formwork	O I S	BF BF OF	A A A

*Анализ трудоемкости операций*

Трудоемкость и стоимость выполнения каждой операции (функции) находят по проектно-сметной документации, либо по нормам ГЭСН, ЕНиР и прочему. В укрупненном виде трудоемкость представлена в табл. 4.

**Таблица 4**

Трудозатраты в % от общих трудозатрат на бетонные работы

Вид работ	По проекту	По ЕНиР Е4-1	По данным А.А. Афанасьева [9]
Установка опалубки	37	40–50	35–60
Установка арматуры	14	15–25	10–25
Бетонирование	32	10–20	10–25
Разборка опалубки	17	15–25	15–25

**Table 4**

Labor Costs as a Percentage of Total Labor Costs for Concrete Work

Type of Work	By Project	By ENiR E4-1	By Data from A.A. Afanasyev [9]
Formwork Erection	37	40–50	35–60
Reinforcement Placement	14	15–25	10–25
Concreting	32	10–20	10–25
Formwork Removal	17	15–25	15–25

Дальнейший анализ предусматривает определение нежелательных эффектов (недостатков, проблем), сопровождающих выполнение отдельных операций процесса.

*Определение нежелательных эффектов (НЭ) операций*

Операция F7.1. Очистка опалубки (удаление остатков бетона с поверхности опалубки):

НЭ7.1.1 — ручной труд, большие трудозатраты;

НЭ7.1.2 — возможны повреждения рабочей поверхности опалубки;

НЭ7.1.3 — возможен недостаточный уровень выполнения функции очистки.

Операция F7.2. Смазка опалубки:

НЭ7.2.1 — ручной труд, большие трудозатраты;

НЭ7.2.2 — при недостаточной или избыточной смазке ухудшается поверхность монолитной конструкции (задиры, масляные пятна);

НЭ7.2.3 — возможен недостаточный уровень выполнения функции смазки.

Операция F7.3. Монтаж (сборка) опалубки:

НЭ7.3.1 — ручной труд, большие трудозатраты;

НЭ7.3.2 — обычно требуется грузоподъемный механизм;

НЭ7.3.3 — недостаточная точность монтажа, что требует дальнейшей выверки опалубки;

НЭ7.3.4 — при недостаточной жесткости опалубка может потерять устойчивость или сдвинуться при бетонировании;

НЭ7.3.5 — при неплотной пригонке щитов возможны протечки цементного молока.

Операция F7.4. Выверка опалубки (в плане, по вертикали и высотным отметкам):

НЭ7.4.1 — ручной труд, большие трудозатраты;

НЭ7.4.2 — требуются точные приборы и средства измерений;

НЭ7.4.3 — неточная выверка приводит к нарушению геометрии конструкций.

Операция F7.5. Закрепление опалубки:

НЭ7.5.1 — возможны отклонения опалубки от установленного положения;

НЭ7.5.2 — повышенные трудозатраты при использовании неинвентарных креплений;

НЭ7.5.3 — плохое закрепление приводит к дефектам конструкции;

НЭ7.5.4 — необходимость анкерных устройств на местности или на монтажном горизонте.

Операция F8.1. Установка арматуры:

НЭ8.1.1 — ручной труд, большие трудозатраты;

НЭ8.1.2 — задержка работ при чистке арматуры от ржавчины;

НЭ8.1.3 — смещение фиксаторов защитного слоя и арматуры при движении рабочих по арматуре (если не установлены трапы), а также при укладке и уплотнении бетонной смеси.

Операция F8.2. Выверка арматуры:

НЭ8.2.1 — затраты времени на разметку и выверку арматуры.

Операция F8.3. Вязка (сварка) арматуры:

НЭ8.3.1 — ручной труд, минимальная степень механизации;

НЭ8.3.2 — нарушение шага креплений;

НЭ8.3.3 — снижение прочности арматуры при сварке стержней.

Операция F8.4. Закрепление арматуры:

НЭ8.4.1. — ручной труд, большие трудозатраты.

Операция F9.1. Укладка бетонной смеси:

НЭ9.1.1 — требуется механизм для укладки смеси (кран с бадьей, бетононасос, бетоноукладчик и прочее);

НЭ9.1.2 — возможны смещения опалубки, арматуры, закладных деталей, утеплителя (последствия НЭ7.3.4, НЭ8.3.2);

НЭ9.1.3 — в бетонную смесь попадает воздух, для удаления которого требуется последующая операция уплотнения смеси.

Операция F9.2. Уплотнение бетонной смеси:

НЭ9.2.1 — ручной труд, большие трудозатраты;

НЭ9.2.2 — вредное воздействие вибрации на рабочего;

НЭ9.2.3 — возможны смещения опалубки, арматуры, закладных деталей, утеплителя;

НЭ9.2.4 — застревание наконечника глубинного вибратора в арматуре;

НЭ9.2.5 — трудно контролировать высоту слоев укладки и качество уплотнения, особенно в вертикальной опалубке и под проемообразователями;

НЭ9.2.6 — недостаточное уплотнение, зависание смеси на арматуре.

Операция F9.3. Устройство рабочих швов:

НЭ9.3.1 — нарушение монолитности конструкции, снижение долговечности;

НЭ9.3.2 — непроектный рабочий шов при сбоях в поставке бетонной смеси.

Операция F9.4. Уход за бетоном:

НЭ9.4.1 — снижение прочности бетона при плохом уходе;

НЭ9.4.2 — длительное твердение бетона в опалубке, снижающее темпы работ при многократно обрачиваемой опалубке;

НЭ9.4.3 — трудности определения прочности бетона в конструкциях (при отсутствии доступа);

НЭ9.4.4 — большие дополнительные затраты в зимнее время;

НЭ9.4.5 — бетон прилипает к опалубке, что требует ее очистки и смазки и вызывает НЭ 10.2, 10.3.

Операция F10. Распалубка:

НЭ10.1 — ручной труд, большие трудозатраты;

НЭ10.2 — требуется большое усилие для отрыва крупнощитовой и блочной опалубки от бетона;

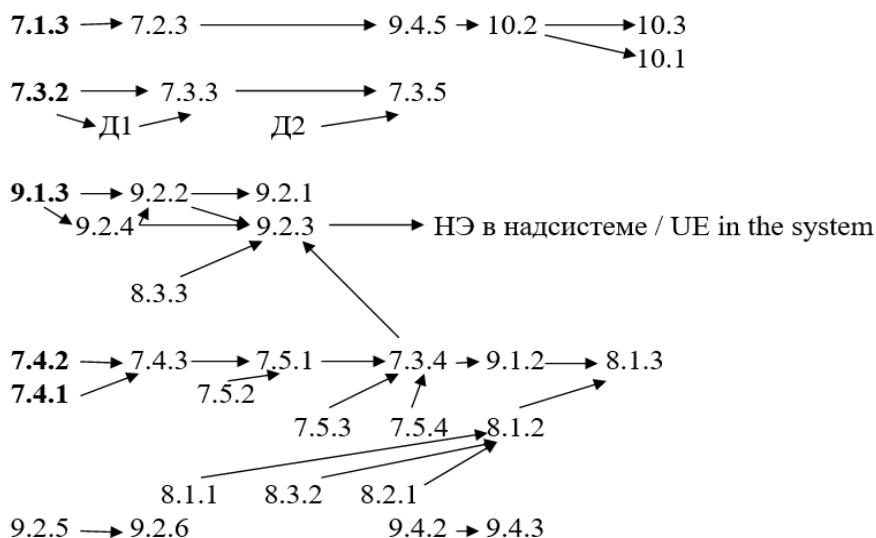
НЭ10.3 — возможны повреждения изготовленной конструкции и опалубки.

Итого при описании технологии выявлено 45 нежелательных эффектов. Формулировка нежелательных эффектов, возникающих на технологических переделах, позволяет ставить и решать задачи по совершенствованию процесса. Например, трудность контроля качества укладки и уплотнения смеси практически исчезает при использовании прозрачной опалубки, предложенной в Японии.

#### *Анализ причинно-следственных связей (ПСС)*

Определение причинно-следственных связей нежелательных эффектов позволяет выявить узловые и ключевые НЭ, а также выявить новые НЭ, которые не были определены при первоначальном анализе технологических операций.

При построении ПСС выявлено несколько цепочек причин и их следствий (рис. 2).



**Рис. 2.** Причинно-следственные связи нежелательных эффектов: полужирным выделены ключевые НЭ

**Fig. 2.** Cause-and-effect relationships of undesirable effects: key undesirable effects are highlighted in bold

Результатом построения ПСС должно быть уточнение и корректировка выявленных НЭ. На рис. 2 такие дополнительные нежелательные эффекты указаны как Д1 и Д2. Одной из причин недостаточной точности установки опалубки является большая погрешность перемещений груза краном, такой НЭ обозначен Д1. При монтаже опалубки возможны неровности поверхности готового бетона, с которым сопрягается опалубка при установке на следующую захватку, а также неровности самой опалубки (например, в результате ее износа и превышения паспортной оборачиваемости), что также может привести к возникновению НЭ 7.3.5 — наличие щелей, через которые возможна протечка бетонной смеси. Этот НЭ на модели обозначен Д2.

#### *Матрица «значимость функции – стоимость»*

Результаты функционального и стоимостного анализов сведем в матрицу «значимость функции – стоимость выполнения функции» (табл. 5).

Из полученной матрицы следует, что приоритет в свертывании операций следует отдать опалубочным работам, наиболее затратным и трудоемким. Между операциями приоритеты определяются согласно их значимости, начиная от наименее значимых операций. Если имеются данные о стоимости и трудоемкости каждой операции, то процедуры свертывания устанавливают по конкретному соотношению между значимостью функции и стоимостью ее вы-

полнения. Следует отметить, что результат анализа матрицы табл. 5 зависит от вида применяемой опалубки и арматурных изделий. При использовании блочной опалубки, товарной стержневой арматуры или заводских армокаркасов приоритеты могут измениться.

**Таблица 5**

Матрица «значимость функции – стоимость выполнения функции» (фрагмент)

Функции операций	Значимость функции, %	Трудоемкость, %	Затраты, %	Кол-во НЭ	Приоритет свертки
7.1. Очистка опалубки	2	45	38	3	1
7.2. Смазка опалубки	11			3	2
7.3. Установка опалубки	25			5	5
7.4. Выверка опалубки	14			3	3
7.5. Крепление опалубки	18			4	4
9.1. Укладка смеси	50	25	30	3	9
9.2. Уплотнение смеси	33			6	8
9.3. Устройство швов	8,5			2	6
9.4. Уход за бетоном	8,5			5	7

**Table 5**

“Function Significance – Cost of Function Execution” Matrix (fragment)

Operation Functions	Function Significance, %	Labor Input, %	Costs, %	Number of UEs	Consolidation Priority
7.1. Formwork Cleaning	2	45	38	3	1
7.2. Formwork Oiling	11			3	2
7.3. Formwork Installation	25			5	5
7.4. Formwork Alignment	14			3	3
7.5. Formwork Securing	18			4	4
9.1. Mix Placement	50	25	30	3	9
9.2. Mix Compaction	33			6	8
9.3. Joint Forming	8.5			2	6
9.4. Concrete Curing	8.5			5	7

### *Свертывание операций бетонных работ*

Рассмотрим некоторые примеры свертывания технологического процесса железобетонных работ. Прежде всего, свертыванию подлежат операции, на которых возникают ключевые НЭ, являющиеся причинами остальных НЭ.

В выбранной модели это операция монтажа опалубки. В этом случае условие свертывания формулируется следующим образом.

Операцию монтажа опалубки можно не выполнять, если:

- 1) нет опалубки;
- 2) устранена операция укладки бетонной смеси;
- 3) устранена необходимость в изменении параметров операции заливки бетона таким образом, что опалубка становится не нужна;
- 4) монтаж опалубки выполняется на операциях изготовления опалубки или транспортировки опалубки;
- 5) монтаж опалубки будет выполнен на операции установка арматуры или операции укладка бетонной смеси;
- 6) монтаж опалубки будет выполняться на новой операции.

На сегодня есть варианты готовых решений для варианта «1»: торкретирование на основу, использование строительного 3D-принтера, укладка в грунтовую траншею или в скважину.

Вариант свертки «3»: применение метода опускаемого бетона по патентам RU 2604098, 2657565 (опалубка остается на месте, а бетон опускается вниз).

В случае если решение для свертывания опалубки не найдено или не подходит по критериям эффективности, то переходят к следующим операциям, на которых возникают НЭ, например: для устранения НЭ прилипания бетонной смеси и исключения операций покрытия опалубки эмульсией, очистки опалубки от прилипшего бетона можно выйти на решения применения несъемной опалубки или использования опалубки, изготовленной из антиадгезионного материала или с покрытием из такого материала. Известно, что палуба из нержавеющей стали с полировкой не требует смазки и увеличивает оборачиваемость.

Опалубку можно не выверять, если: 1) нет опалубки; 2) ликвидируется операция установки опалубки (скользящая опалубка; горизонтально перемещаемая опалубка; метод подъема монолитных перекрытий, метод опускаемого бетона); 3) выверка выполняется на операции установки (безвыверочный монтаж опалубки по тупикам, порогам; скользящая опалубка).

Арматуру можно не выверять если: 1) нет арматуры; 2) арматура устанавливается на предыдущих операциях (армо-опалубочные блоки; несъемная стальная опалубка, выполняющая функции арматуры; фибробетон); 3) арматура устанавливается на последующих операциях (установка и натяжение арматуры в каналах конструкции, внешняя напрягаемая арматура).

Бетонную смесь можно не уплотнять, если: 1) нет бетонной смеси, но данный вариант недопустим, поскольку связан с объектом главной функции; 2) неуплотненная бетонная смесь имеет параметры, необходимые для создаваемой конструкции, или другое решение: при укладке в смесь не вовлекается воздух (литые, самоуплотняющиеся бетонные смеси с пластифицирующими добавками; метод вертикально перемещаемой трубы; метод восходящего раствора; напорное бетонирование, строительный 3D-принтер); 3) вместо существующей вводится новая операция: торкретирование; набрызг смеси; бункер с роторным метателем.

Свертывание создающих операций и решение задач, связанных со свертыванием создающих операций, позволяет исключить исправительные операции и избежать потерь времени на решение задач исправительных операций.

Рассмотрим процедуры свертки обеспечивающих операций.

Уход за бетоном не требуется, если: 1) нет бетона; 2) на предшествующих операциях обеспечиваются благоприятные условия для твердения бетона (несъемная опалубка из пенополистирольных блоков; метод термоса; тепляки; противоморозные и тепловыделяющие добавки); 3) бетон быстро твердеет (вакуумирование; способы термообработки; использование быстротвердеющих цементов).

Распалубку можно не производить, если: 1) нет опалубки (безопалубочные способы бетонирования); 2) распалубка производится на предшествующих операциях (скользящая опалубка); 3) распалубка не требуется (несъемная опалубка, дешевая одноразовая опалубка из картона, метод опускаемого бетона).

#### *Анализ решений, определение новых нежелательных эффектов*

Проанализируем технические решения, предложенные в результате свертывания. При использовании скользящей опалубки с антиадгезионным покрытием палубы ликвидируются операции 7.1–7.5 и 10.1–10.3 и связанные с ними нежелательные эффекты НЭ7.1.1–НЭ7.1.3, НЭ7.2.1–НЭ7.2.3, НЭ7.3.1–НЭ7.3.5, НЭ7.4.1–НЭ7.4.3, НЭ7.5.1–НЭ7.5.4, НЭ10.1–10.3. При этом появляются операции установки домкратных стержней, синхронного перемещения опалубки и возникают следующие нежелательные эффекты: ограничения в планировке несущих стен; сложность устройства перекрытий; применение сложного оборудования (насосная станция, домкраты, система синхронизации); низкое качество поверхности бетона; расход стали на домкратные стержни; повышенные требования к организации строительства и квалификации

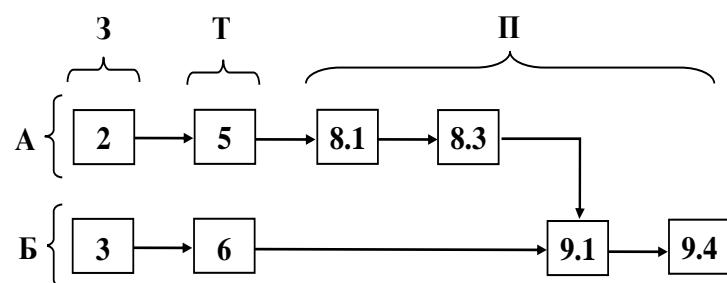
персонала. Положительным эффектом способа скользящей опалубки является высокая производительность (20–30 см в час).

При использовании несъемной опалубки из пенополистирольных блоков и литой бетонной смеси с подачей автобетононасосом ликвидируются функции операций 7.1, 7.2, 7.4, 9.2, 10.1–10.3 и связанные с ними нежелательные эффекты НЭ7.1.1–7.1.3, 7.2.1–7.2.3, НЭ9.1.1–9.1.3, НЭ9.2.1–9.2.6, НЭ9.4.1–9.4.5, НЭ10.1–10.3. Трудность определения прочности бетона в конструкциях усугубляется (НЭ9.3.4). Возникает положительный эффект защиты бетонной смеси от неблагоприятных воздействий окружающей среды. При использовании бетонной или стальной несъемной опалубки она может включаться в расчет на несущую способность (совместно с монолитной конструкцией), выполнять функции поддерживающих лесов, отделки, гидроизоляции, закладных деталей.

Безопалубочный способ торкретирования ликвидирует функции операции 7.1–7.5, 9.2, 10.1–10.3 и нежелательные эффекты указанных операций. При этом появляется операция устройства основы, на которую наносится смесь, и возникают следующие нежелательные эффекты: отскок бетонной смеси; необходимость сложного оборудования и высокой квалификации рабочих; низкая производительность работ. Положительными эффектами способа торкретирования являются: повышенная плотность бетона и улучшение его физико-механических характеристик; устройство криволинейных конструкций; возможность создания несъемной опалубки.

При использовании технологии строительного 3D-принтера не нужна опалубка, уход за бетоном, так как применяется непрерывная укладка из форсунки быстротвердеющей смеси. Таким образом, ликвидируются функции операции 7.1–7.5, 8.2, 8.4, 9.2–9.3, 10.1–10.3 (12 функций операций из 16) и нежелательные эффекты НЭ7.1.1–7.1.3, 7.2.1–7.2.3, НЭ9.1.1–9.1.3, НЭ9.2.1–9.2.6, НЭ9.4.1–9.4.5, НЭ10.1–10.3. При этом возникают следующие нежелательные эффекты: необходимость специальной быстротвердеющей бетонной смеси, сложного оборудования и высокой квалификации настройщиков; низкая производительность работ.

Технология с применением 3D-принтера намного упрощается (рис. 3): остаются лишь операции 8.1 и 8.3 установки арматуры, 9.1 укладки бетонной смеси и 9.4 ухода за бетоном. Не требуются опалубочные операции, уплотнение бетонной смеси и устройство рабочих швов. Если применить фибрю вместо арматуры, то устраняются операции 8.1 и 8.3. При использовании быстротвердеющих составов значительно упрощается уход за бетоном вплоть до полной ликвидации этой операции.



**Рис. 3.** Структурная модель технологии «Строительный 3D-принтер»: обозначения см. на рис. 1.

**Fig. 3.** Structural model of the “Construction 3D Printer” technology: designations are as per Fig. 1.

Положительными эффектами (ПЭ) способа являются: полное устранение человеческого фактора при роботизированной укладке арматуры и смеси; устройство криволинейных кон-

структур; возможность применения сменного или параллельного оборудования для устройства надуваемого или пенного утеплителя, установки связей и арматуры, устройства пустотных перекрытий.

Для повышения производительности и качества 3D-печати возможно совместить экструдер с небольшой опалубкой, а опалубку подогревать. Если при этом использовать полистиролбетон, то можно изготавливать теплую наружную стену по одностадийной технологии (патент НГАСУ-Сибстрин [11]). Изменяя в рецептуре смеси содержание полистирола, можно увеличивать или уменьшать теплоизоляционные или конструкционные свойства стены.

Метод опускаемого бетона по патентам RU 2604098, RU 2657565 представляет собой инверсию скользящей вверх опалубки и заключается в формировании конструкции слоями в неподвижной опалубке с постепенным опусканием конструкции вниз [12]. При использовании этого метода с антиадгезионным покрытием поверхности бетона полимерной пленкой ликвидируются функции операций 7.1–7.5, 10.1–10.3 и связанные с ними нежелательные эффекты.

При этом появляются операции установки домкратных стержней, механизма опускания бетона и возникают следующие нежелательные эффекты: применение сложного оборудования (насосная станция, домкраты); дополнительный расход стали на домкратные стержни; повышенные требования к организации строительства и квалификации персонала. Положительным эффектом способа опускаемого бетона является высокая производительность (6–30 см в час) и экономия энергии за счет использования силы тяжести.

Результаты анализа различных технологий бетонных работ по методике ФСА представлены в табл. 6.

**Таблица 6**  
Результаты анализа различных технологий бетонных работ

Технология бетонных работ	Ликвидируются		Появляются		
	$F_e$	НЭ <sub>e</sub>	$F_d$	НЭ <sub>d</sub>	ПЭ <sub>d</sub>
Скользящая опалубка	8	12	2	6	1
Несъемная опалубка и литая бетонная смесь (СУБС)	7	21	—	1	1
Торкретирование	9	22	1	4	3
Строительный 3D-принтер	12	25	—	3	3
Метод опускаемого бетона	8	12	2	3	2

**Table 6**  
Analysis Results of Various Concrete Work Technologies

Concrete Work Technology	Eliminated		Introduced		
	$F_e$	$UE_e$	$F_i$	$UE_i$	$BE_i$
Slipform	8	12	2	6	1
Permanent formwork and SCC (Self-Compacting Concrete)	7	21	—	1	1
Shotcreting	9	22	1	4	3
Construction 3D Printer	12	25	—	3	3
Tremie Method	8	12	2	3	2

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из данных табл. 6 следует, что наибольшие показатели эффективности свертывания по методике ФСА имеет технология «Строительный 3D-принтер». Вместе с тем окончательные выводы об эффективности того или иного варианта технологий могут быть сделаны только после всесторонней оценки экономической целесообразности для конкретного объекта. При этом из-

менения технологии должны рассматриваться комплексно и взаимоувязываться с архитектурно-конструктивными решениями, вопросами качества и безопасности как на стадии строительства, так и в процессе эксплуатации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмина Е.А., Кузьмин А.М. Функционально-стоимостной анализ. Экскурс в историю // Проблемы менеджмента качества. 2002. № 7. С. 14–20.
2. Моисеева Н.К., Карпунин М.Г. Основы теории и практики функционально-стоимостного анализа. М. : Высшая школа, 1988. 192 с.
3. Мисаков В.С. Функционально-стоимостной анализ в строительстве. М. : Финансы и статистика, 1986. 114 с.
4. Cooper R., Slagmulder R. Target Costing and Value Engineering. 2017.
5. Federal Acquisition Regulation. Part 48. Value Engineering. USA.
6. Альтшулер Г.С., Злотин Б.Л., Филатов В.И. Профессия — поиск нового (Функционально-стоимостной анализ и теория решения изобретательских задач как система выявления резервов экономии). Кишинёв : Картая Молдовеняскэ, 1985. 196 с.
7. Байбурин А.Х., Мангушев Р.А., Kocharin N.B. Функционально-стоимостной анализ строительных технологий : учебное пособие для вузов. СПб. : Лань, 2024. 216 с.
8. Байбурин А.Х., Толкынбаев Т.А., Kocharin N.B. Функционально-стоимостной анализ технологии забивных свай // Эксперт: теория и практика. 2023. № 3 (22). С. 46–57.
9. Афанасьев А.А. Интенсификация работ при возведении зданий и сооружений из монолитного железобетона. М. : Стройиздат, 1990. 384 с.
10. Красный Ю.М., Красный Д.Ю. Монолитное домостроение. М. : Изд-во АСВ; Екатеринбург : УГТУ, 2000. 550 с.
11. Молодин В.В., Гасенко И.И., Тимин П.Л. Технология 3D-печати одностадийным полистиролбетоном // Наука и инновационные технологии. 2020. № 14 С. 278–287.
12. Хафизов Т.М., Байбурин А.Х., Денисов С.Е., Овчинников А.Д. Способ совмещенного строительства зданий и сооружений посредством опускающегося бетона // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2023. Т. 23. № 1. С. 37–47.

## REFERENCES

1. Kuzmina E.A., Kuzmin A.M. Functional cost analysis: An excursion into history. *Problems of quality management*. 2002; 7:14-20. (in Russian).
2. Moiseeva N.K., Karpunin M.G. *Fundamentals of theory and practice of functional cost analysis*. Moscow, Higher School, 1988; 192. (in Russian).
3. Misakov V.S. *Functional and cost analysis in construction*. Moscow, Finance and Statistics, 1986; 114. (in Russian).
4. Cooper R., Slagmulder, R. *Target Costing and Value Engineering*. 2017.
5. Federal Acquisition Regulation. Part 48. Value Engineering (USA).
6. Altshuller G.S., Zlotin B.L., Filatov V.I. *Profession is a search for new things: Functional cost analysis and the theory of inventive problem solving as a system for identifying saving reserves*. Chisinau, Cartea Moldoveniasca, 1985; 196. (in Russian).
7. Bayburin A.H., Mangushev R.A., Kocharin N.V. *Functional and cost analysis of construction technologies*. St. Petersburg, Lan, 2024; 216. (in Russian).
8. Baiburin A.Kh., Tolkynbaev T.A., Kocharin N.V. Functional and cost analysis of driven pile technology. *Expert: Theory and Practice*. 2023; 3(22):46-57. (in Russian).
9. Afanasiev A.A. *Intensification of work in the construction of buildings and structures from monolithic reinforced concrete*. Moscow, Stroyizdat, 1990; 384. (in Russian).
10. Krasny Yu.M., Krasny D.Yu. *Monolithic building*. Moscow, Publishing house ASV; Ekaterinburg, USTU, 2000; 550. (in Russian).
11. Molodin V.V., Gasenko I.I., Timin P.L. 3D Printing Technology with Single-Stage Polystyrene Concrete. *Science and Innovative Technologies*. 2020; 14:278-287. (in Russian).
12. Khafizov T.M., Bayburin A.Kh., Denisov S.E., Ovchinnikov A.D. Method of Combined Construction of Buildings and Structures by Means of Lowering Concrete. *Bulletin of SUSU: Construction and Architecture*. 2023; 23(1):37-47. (in Russian).