

УДК 69.057:621.9.04:658.15**Особенность возведения несъёмной опалубки при помощи 3D печати: экономические аспекты****Преснов Олег Михайлович**

Кандидат технических наук, доцент,
Сибирский федеральный университет,
660041, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79;
e-mail: presn995@mail.ru

Толеренок Кирилл Андреевич

Студент,
Сибирский федеральный университет,
660041, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79;
e-mail: presn995@mail.ru

Маматкулов Шероз Дилмуродович

Студент,
Сибирский федеральный университет,
660041, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79;
e-mail: presn995@mail.ru

Краснов Ростислав Владимирович

Студент,
Сибирский федеральный университет,
660041, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79;
e-mail: presn995@mail.ru

Аннотация

В статье исследуются технологические особенности применения 3D-печати для создания несъёмной опалубки в строительстве, что является одним из наиболее инновационных подходов в области строительных технологий. Подробно анализируются преимущества данного метода, включая значительное сокращение трудозатрат, которое может достигать до 40%. Это достигается за счет автоматизации процесса и уменьшения необходимости в ручном труде. Кроме того, отмечается экономия материалов в пределах 15-20%, что обусловлено более точным дозированием и минимизацией отходов. Ускорение строительных процессов в 1,5-2 раза позволяет существенно сократить сроки реализации проектов, что особенно важно в условиях современных быстрых темпов строительства. Особое внимание в статье уделено вопросам экологичности при использовании композитных материалов и бетонных смесей, адаптированных для 3D-печати. Это не только способствует снижению углеродного следа, но и повышает

долговечность и надежность конструкций. Рассмотрены технические параметры экструдеров, включая их производительность и точность, а также требования к строительным смесям, которые должны обладать определенной вязкостью и скоростью затвердевания. Выявлены основные технологические ограничения, такие как ограничение в размерах печатаемых объектов и необходимость в специализированном оборудовании. Предложены пути их преодоления, включая разработки новых материалов и улучшение характеристик оборудования. На основе экспериментальных данных продемонстрирована эффективность технологии при создании сложных архитектурных форм, что открывает новые возможности для архитекторов и инженеров в реализации уникальных проектов.

Для цитирования в научных исследованиях

Преснов О.М., Толеренок К.А., Маматкулов Ш.Д., Краснов Р.В. Особенность возведения несъёмной опалубки при помощи 3D печати: экономические аспекты // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2025. Том 15. № 2А. С. 706-714.

Ключевые слова

3D-печать, несъёмная опалубка, строительные технологии, бетон, композитные материалы, экструдер, цифровое строительство.

Введение

История появления 3D-принтеров в строительстве начинается с 1939 года, когда изобретатель Уильям Э. Уршель создал первое в мире здание из послойных слоёв бетона в штате Индиана, США. Его так называемая «машина для строительства стен» состояла из автоматического трамбовочного механизма, который сжимал бетон между вращающимися дисками, уплотняя и разглаживая каждый слой по мере экструдирования материала [Максимов, 2017].

В начале XXI века сразу несколько независимых групп учёных из разных стран начали исследования в области технологии 3D-печати в сфере строительства. В 2012 году были представлены первые потребительские строительные 3D-принтеры. В 2020–2022 годах стало понятно, что эффективность строительной 3D-печати оправдывается (дешевле, быстрее, экологичнее), и в отрасль начали поступать крупные инвестиции [Адамцевич и др., 2023].

3D-печать, также известная, как аддитивное производство (AM) [Максимов, 2022], является новой технологией в строительной отрасли, особенно для создания несъёмной опалубки. Несъёмная опалубка — это тип формы, используемый при возведении бетонных конструкций, которая остается на месте после затвердевания бетона. В отличие от традиционной опалубки, которая снимается после схватывания бетона, несъёмная опалубка может обеспечить конструктивные преимущества, такие как изоляция, огнестойкость или интеграция с дизайном здания. Развитие аддитивных производств открыло новые возможности для изготовления такой опалубки, что позволяет создавать индивидуальные, экономичные и экологически чистые решения.

В этой статье рассматривается технология, лежащая в основе 3D-печати несъёмной опалубки, ее преимущества, проблемы и потенциальные возможности применения в строительной отрасли в будущем.

Данная технология строительства ничем не отличается от самого популярного способа

печати методом экструзии расплавленным пластиком — FDM, разве что сопло гораздо большего диаметра — около 50 мм, а вместо пластика самоотверждающийся композитный материал на основе цемента и армирующих добавок — фибро волокна, полимеров и т.д[2]. Простыми словами экструдер укладывает бетон по заданной траектории. Фактически задача принтера сформировать стены заданной геометрической формы, а затем в полости заливается бетон и закладывается арматура.

Основная часть

Применение аддитивных технологий может помочь решить проблему отставания от графика сдачи жилья и оптимизировать методику возведения конструкций в монолитном строительстве. Сейчас каркасы таких объектов формируют с помощью опалубок — временных конструкций, в которые заливают раствор бетона, чтобы он застыл в нужной форме.

Монолитное строительство получило большую популярность благодаря возможности более быстрого возведения зданий в сравнении с кирпичными конструкциями. Прочный монолитный каркас также обеспечивает высокую надежность и долговечность.

Выбор материалов для несъемной опалубки для 3D-печати имеет решающее значение, поскольку она должна соответствовать конструктивным, тепловым и экологическим характеристикам. К распространенным материалам относятся:

Материалы, похожие на бетон обеспечивают хорошую текучесть, адгезию между слоями и быстроту схватывания. Разработаны специальные бетонные смеси для 3D-печати. Эти бетонные смеси часто содержат связующие, ускорители и волокна для повышения прочности и долговечности.

Преимущества заключаются в высокой прочности на сжатие, долговечность и интеграция с конечной структурой бетона.

Проблемы в требовании точного контроля состава смеси и параметров печати, чтобы избежать таких проблем, как растрескивание или плохое сцепление.

Полимерные композиты: армированные стекловолокном полимеры (FRP) или термопласты, также могут быть использованы для изготовления опалубки с 3D-печатью[Демиденко и др., 2017]. Эти материалы могут обеспечить дополнительные преимущества, такие как лёгкость, теплоизоляция и простота в обращении.

Преимущества исходят из лёгкого веса, возможности многократного использования, устойчивости к коррозии и обеспечении тепло- и звукоизоляционные свойства.

Проблемы как правило, более низкая прочность по сравнению с бетоном, и для обработки и отверждения может потребоваться специальное оборудование.

Переработанные материалы: отходы пластмасс, резины или даже строительный мусор, для создания устойчивой опалубки, напечатанной на 3D-принтере. Эти материалы могут снизить воздействие на окружающую среду, сохраняя при этом приемлемые конструктивные свойства.

Преимущества этих материалов в экологичности, экономичности и в большом вкладе в экономику замкнутого цикла.

Проблемы же состоят из потенциальной изменчивости качества материалов, которая может повлиять на стабильность и долговечность.

Одним из наиболее существенных преимуществ 3D-печати для несъемной опалубки является ее способность создавать очень сложные и индивидуальные формы, которые при использовании традиционных методов изготовления опалубки были бы сложными или

непомерно дорогими. Некоторые ключевые особенности включают:

3D-печать позволяет создавать опалубку со сложными деталями, изгибами и нестандартной геометрией, которые могут улучшить эстетику и функциональность здания. Это могут быть органические формы, стены произвольной формы или индивидуальные изоляционные полости, которые способствуют повышению энергоэффективности.

Гибкость конструкции, обеспечиваемая 3D-печатью, позволяет оптимизировать опалубку как с точки зрения целостности конструкции, так и с точки зрения эффективности использования материалов. Например, для снижения расхода материала при сохранении требуемой прочности можно использовать внутренние полости или пустоты.

3D-печать позволяет интегрировать опалубку в другие строительные системы, такие как водопроводные каналы, электропроводки или изоляция. Это уменьшает необходимость в отдельных установках и может повысить общую энергоэффективность и экономическую эффективность.

Процесс изготовления несъемной опалубки, напечатанной на 3D-принтере, включает в себя несколько ключевых этапов:

Этап проектирования начинается с программного обеспечения для 3D-моделирования. Создается цифровая модель опалубки. Эта модель должна быть очень подробной, чтобы обеспечить точность окончательной печати и учесть поведение материала при ожидаемых нагрузках.

Одни из популярных программных обеспечений для 3D-моделирования это AutoCAD, Компас, Revit, Rhino и специализированные программы архитектурного проектирования, такие как Grasshopper, которые позволяют создавать сложные геометрические формы.

Материал для опалубки выбирается в зависимости от его требуемых свойств. При нанесении бетонной краски разрабатывается подходящая смесь для обеспечения достаточной текучести, сцепления и прочности.

Смесь часто модифицируется в соответствии с местными условиями окружающей среды, такими как температура и влажность, что может повлиять на время отверждения и эксплуатационные характеристики материала.

3D-принтер выдавливает материал слой за слоем в соответствии со спецификациями проекта. Печать обычно выполняется в контролируемых условиях, чтобы предотвратить такие проблемы, как растрескивание или смещение слоёв. Опалубка может быть напечатана непосредственно на месте или за его пределами, в зависимости от проекта.

При печати на месте снижают транспортные расходы и обеспечивают немедленную интеграцию в процесс строительства. Плюс обеспечивают более высокий контроль качества и более быструю сборку на месте.

После печати опалубке дают затвердеть. Для материалов на основе бетона может потребоваться подождать от нескольких часов до нескольких дней, пока материал наберёт необходимую прочность, прежде чем его можно будет использовать для формирования окончательной бетонной конструкции.

В зависимости от материала могут потребоваться некоторые виды обработки после печати, такие как нанесение финишного слоя, покрытия или армирование для придания дополнительной прочности.

Сравним скорости 3D-печати и традиционной сборки:

$$Q = \frac{H_{ep} \cdot V}{E}, \quad (1)$$

где Q – трудоемкость, чел.-час;

H_{ep} – на 1 м^2 взята из ЕНиР 4;

V – объём работ;

E – единица измерения, на которую в ЕНиР дана норма времени.

$$Q = \frac{H_{ep} \cdot V}{E \cdot T_{cm} \cdot n}, \text{ чел} - \text{дн.} \quad (2)$$

где T_{cm} – продолжительность смены (8 ч.); n – число смен в рабочем дне.

$$Q_{\partial} = \frac{0,62 \cdot 100}{1 \cdot 8 \cdot 3} = 2,58, \text{ чел-дн.}$$

$$Q_m = \frac{0,39 \cdot 100}{1 \cdot 8 \cdot 3} = 1,68, \text{ чел-дн.}$$

$$Q_n = \frac{0,62 \cdot 100}{1 \cdot 8 \cdot 3} = 2,58, \text{ чел-дн.}$$

Примечание: норма времени для установки деревянной и 3D-печатной опалубки установлена одинаковой, поскольку в рамках норм труда отсутствуют конкретные нормативы для 3D-печати. Однако трудозатраты при использовании 3D-печати ожидаемо ниже, поскольку этот процесс не включает те дополнительные этапы и сложности, характерные для монтажа деревянной опалубки.

$$T_o = \frac{Q}{N \cdot T_{cm} \cdot n}, \text{ дн,} \quad (3)$$

где T_o – продолжительность выполнения объёма работ;

Q – трудоёмкость работ чел.-час, определённая по калькуляции затрат труда;

T_{cm} – продолжительность смены (8 ч.);

n – количество смен,

N – количество рабочих в звене.

$$T_{\partial} = \frac{62}{2 \cdot 8 \cdot 3} = 1,29 \text{ дн.}$$

$$T_m = \frac{39}{2 \cdot 8 \cdot 3} = 0,81 \text{ дн.}$$

$$T_n = \frac{62}{2 \cdot 8 \cdot 3} = 1,29 \text{ дн.}$$

Примечание: несмотря на значительное сокращение трудозатрат по сравнению с другими типами опалубок, продолжительность выполнения работ при использовании 3D-печати может варьироваться и превышать объём работ. Это обусловлено ограничениями по скорости самого процесса печати, что, в свою очередь, может не обеспечить существенно большую производительность.

Большим преимуществом несъемной опалубки созданной при помощи 3D-печати это экономическая эффективность. Несмотря на то, что первоначальная стоимость 3D-принтеров и материалов может быть высокой, возможность изготовления сложных форм без использования традиционных пресс-форм или внешней опалубки может снизить общие затраты на строительство, особенно в проектах, связанных с индивидуальным дизайном.

Первоначальная стоимость установки высококачественного 3D-принтера (способного печатать опалубку строительных размеров) может стоить от 6 до 30 миллионов рублей. Стоимость этих принтеров может стать серьёзным препятствием для небольших компаний.

Таблица 1 - Сравнение экономических показателей

Тип опалубки	Цена (за м ²), руб.	Преимущества	Недостатки
Деревянная опалубка	500-1500	Низкая стоимость, простота установки, доступность	Одноразовость, высокая эксплуатационная стоимость
Металлическая опалубка	1 500-3500	Многokrатное использование, высокая прочность, долговечность	Высокая стоимость, сложность монтажа, необходимость в спецоборудовании
Опалубка на 3D-принтере	3 000-7000	Меньше трудозатрат на установку, возможность печати сложных форм	Высокая стоимость начальных инвестиций, сложность с оборудованием

Первоначальные затраты установки традиционной опалубки на материалы многократного использования (сталь, древесину) ниже. Для проекта среднего размера:

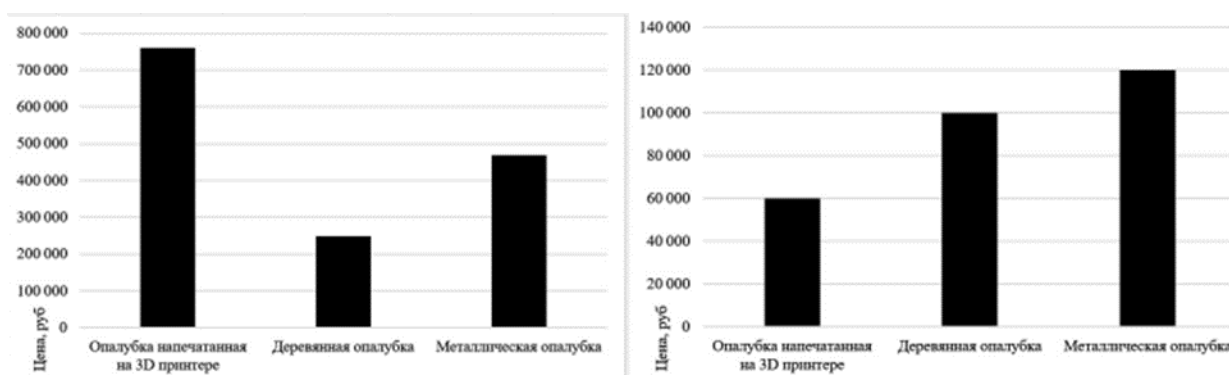


Рисунок 1 - График общей стоимости и затрат на монтаж 100м2

3D-печать значительно ускоряет процесс изготовления опалубки, особенно для нестандартных форм. Прямая печать опалубки сокращает потребность в ручном труде и время, необходимое для установки опалубки, что характерно для традиционных методов.

Возможность печатать материалы в точных количествах сводит к минимуму количество отходов, что приводит к более экологичным методам строительства.

Таблица 2 - Сравнение экологичности методов

Тип опалубки	Экологичность производственного процесса	Экологичность в использовании и утилизации
Деревянная опалубка	Использование возобновляемых ресурсов, но зависит от источников древесины.	Легко перерабатывается, но может быть загрязнена химическими веществами.
Металлическая опалубка	Энергоёмкое производство, но металл можно перерабатывать бесконечно.	Высокая степень переработки, но требует ухода для предотвращения повреждений.
3D-печатная опалубка	Зависит от материала (пластик, возможно с переработанными компонентами).	Преимущество в точности, минимизация отходов, но проблемы с переработкой пластика.

3D-печать:

Отходы материалов: используются точные материалы, что приводит к значительно

меньшему количеству отходов - примерно на 10-15% от используемого материала по сравнению с традиционными методами.

Традиционные методы:

Отходы материалов: при изготовлении традиционной деревянной опалубки образуется около 20-30% отходов (обрезки, непригодные для использования детали).

Потребление энергии: при производстве материалов (распиловка древесины, производство стали) используется большое количество энергии.

3D-печать позволяет создавать проекты, которые трудно, если не невозможно, реализовать с помощью традиционных методов опалубки. Сложная геометрия и интеграция с конструкционной системой открывают возможности для более эффективных и инновационных строительных решений.

Одной из проблем, которая ограничивает, небольшим компаниям, популяризацию данной новой технологии это стоимость приобретения крупномасштабных 3D-принтеров и специализированных материалов.

Но несмотря на значительный прогресс в области материаловедения, ассортимент материалов, пригодных для 3D-печати в строительстве, по-прежнему ограничен. Достижение правильного баланса между прочностью, долговечностью и стоимостью остаётся сложной задачей.

Строительная отрасль жёстко регламентируется, и 3D-печать для несъемной опалубки должна соответствовать установленным стандартам безопасности и качества. Во многих регионах нормативные акты все еще не успевают за развитием технологий.

Заключение

3D-печать несъемной опалубки представляет собой передовое решение, которое обещает произвести революцию в строительной отрасли. Предлагая беспрецедентную гибкость проектирования, эффективность использования материалов и экономию средств, она открывает новые возможности для создания устойчивых и высокопроизводительных зданий. Однако, прежде чем 3D-печать сможет быть полностью интегрирована в крупномасштабные строительные проекты, необходимо решить такие проблемы, как высокие первоначальные затраты, ограниченность материалов и нормативные препятствия. По мере развития технологии она может стать массовым решением, повышающим как экономическую эффективность, так и экологичность строительства во всем мире.

Библиография

1. Адамцевич А.О., Пустовгар А.П., Адамцевич Л.А., Воробьев П.Ю. Исследование особенностей работы бетонных конструкций, изготовленных с применением технологии аддитивного строительного производства [Текст] / А.О. Адамцевич, А.П. Пустовгар, Л.А. Адамцевич, П.Ю. Воробьев // Бетон и железобетон в промышленном и гражданском строительстве. — 2023. — № 12. — С. 38-46.
2. Демиденко А.К., Кулибаба А.В., Иванов М.Ф. Перспективы применения 3D-печати в строительном комплексе Российской Федерации [Текст] / А.К. Демиденко, А.В. Кулибаба, М.Ф. Иванов // Строительство уникальных зданий и сооружений. — 2017. — № 12. — С. 71-96.
3. Максимов Н. М. Аддитивные технологии в строительстве: оборудование и материалы [Текст] / Н. М. Максимов // Аддитивные технологии. — 2017. — № 4. — С. 54-62.
4. Максимов Н. М. От фантастики к реальности: применение 3D-принтера в строительстве домов [Текст] / Н. М. Максимов // Аддитивные технологии. — 2022. — № 2. — С. 40-50.
5. Additive construction: current state, problems and opportunities / Natalie Labonate, Anders Rehnqvist, Bendik Manum,

- Petra Ruther // Norwegian University of Science and Technology, 2016.
6. Additive manufacturing in construction: an overview of digital planning processes, applications, and methods / Alexander Paolini, Stefan Kollmannsberger, Ernst Rank // Technical University of Munich, 2019.
7. Applicability of 3D concrete printing technology in building construction with different architectural design decisions in housing / Çağatay Takva, Semahat Merve Top, Berru İzel Gökgöz, Şeyma Gebel, Zeynep Yeşim İlerisoy, Hüseyin İlcan, Mustafa Şahmaran // Journal of Building Engineering. — 2024. — Vol. 98, 1 December. — Article 111257.
8. Construction 3D printing: The early history of large-scale additive manufacturing / Alexander Church // Massachusetts Institute of Technology, 2022.
9. The application of 3D printing formwork technology in concrete building materials / Zexu Wang, Yiquan Zou // Journal of Electrical Systems. — 2024. — № 20. — pp. 787-796.

Features of Permanent Formwork Construction Using 3D Printing: Economic Aspects

Oleg M. Presnov

PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Siberian Federal University,
660041, 79, Svobodny ave., Krasnoyarsk, Russian Federation;
e-mail: presn995@mail.ru

Kirill A. Tolerenok

Student,
Siberian Federal University,
660041, 79, Svobodny ave., Krasnoyarsk, Russian Federation;
e-mail: presn995@mail.ru

Sheroz D. Mamatkulov

Student,
Siberian Federal University,
660041, 79, Svobodny ave., Krasnoyarsk, Russian Federation;
e-mail: presn995@mail.ru

Rostislav V. Krasnov

Student,
Siberian Federal University,
660041, 79, Svobodny ave., Krasnoyarsk, Russian Federation;
e-mail: presn995@mail.ru

Abstract

The article examines the technological features of using 3D printing to create permanent formwork in construction, representing one of the most innovative approaches in modern building technologies. The advantages of this method are analyzed in detail, including a significant reduction in labor costs (up to 40%) due to process automation and minimized manual work. Additionally,

material savings of 15–20% are achieved through precise dosing and waste reduction. The acceleration of construction processes by 1.5–2 times allows for substantially shorter project timelines, which is particularly crucial in today's fast-paced construction industry. Special attention is given to the environmental benefits of using composite materials and concrete mixtures adapted for 3D printing. This not only reduces the carbon footprint but also enhances the durability and reliability of structures. The technical parameters of extruders, including their productivity and precision, as well as the requirements for construction mixtures (optimal viscosity and curing speed), are discussed. Key technological limitations, such as size constraints of printed objects and the need for specialized equipment, are identified. Solutions to overcome these challenges, including the development of new materials and improved equipment, are proposed. Experimental data demonstrate the effectiveness of this technology in creating complex architectural forms, opening new possibilities for architects and engineers in realizing unique projects.

For citation

Presnov O.M., Tolerenok K.A., Mamatkulov Sh.D., Krasnov R.V. (2025) Osobennost' vozvedeniya nes'yomnoy opalubki pri pomoshchi 3D pechaty: ekonomicheskiye aspekty [Features of Permanent Formwork Construction Using 3D Printing: Economic Aspects]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [Economics: Yesterday, Today and Tomorrow], 15 (2A), pp. 706-714.

Keywords

3D printing, permanent formwork, construction technologies, concrete, composite materials, extruder, digital construction.

References

1. Adamtsevich, A. O., Pustovgar, A. P., Adamtsevich, L. A., & Vorobiev, P. Yu. (2023). Issledovanie osobennostey raboty betonnykh konstruktsey, izgotovlennykh s primeneniem tekhnologii additivnogo stroitel'nogo proizvodstva [Study of the features of concrete structures made using additive construction technology]. *Beton i zhelezobeton v promyshlennom i grazhdanskom stroitel'stve* [Concrete and Reinforced Concrete in Industrial and Civil Engineering], 12, 38-46.
2. Demidenko, A. K., Kulibaba, A. V., & Ivanov, M. F. (2017). Perspektivy primeneniya 3D-pechaty v stroitel'nom komplekse Rossiyskoy Federatsii [Prospects for the application of 3D printing in the construction sector of the Russian Federation]. *Stroitel'stvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy* [Construction of Unique Buildings and Structures], 12, 71-96.
3. Maximov, N. M. (2017). Additivnye tekhnologii v stroitel'stve: oborudovanie i materialy [Additive technologies in construction: Equipment and materials]. *Additivnye tekhnologii* [Additive Technologies], 4, 54-62.
4. Maximov, N. M. (2022). Ot fantastiki k realnosti: primeneniye 3D-printera v stroitel'stve domov [From fantasy to reality: Application of 3D printers in house construction]. *Additivnye tekhnologii* [Additive Technologies], 2, 40-50.
5. Labonate, N., Rehnqvist, A., Manum, B., & Ruther, P. (2016). Additive construction: Current state, problems and opportunities. Norwegian University of Science and Technology.
6. Paolini, A., Kollmannsberger, S., & Rank, E. (2019). Additive manufacturing in construction: An overview of digital planning processes, applications, and methods. Technical University of Munich.
7. Takva, Ç., Top, S. M., Gökgöz, B. İ., Gebel, Ş., İlerisoy, Z. Y., İlcan, H., & Şahmaran, M. (2024). Applicability of 3D concrete printing technology in building construction with different architectural design decisions in housing. *Journal of Building Engineering*, 98(1 December), Article 111257.
8. Church, A. (2022). *Construction 3D printing: The early history of large-scale additive manufacturing*. Massachusetts Institute of Technology.
9. Wang, Z., & Zou, Y. (2024). The application of 3D printing formwork technology in concrete building materials. *Journal of Electrical Systems*, 20, 787-796.