

№5 (20)
2024

Инженерные --- ИССЛЕДОВАНИЯ

ISSN 2782-5582

СОДЕРЖАНИЕ

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СКЛОНОВ: АНАЛИЗ С ПОМОЩЬЮ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ Т.Н. Фам, А.Н. Триеу, Т.Т. Дан	3-12
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МАЛЫХ АРХИТЕКТУРНЫХ ФОРМ НА ОСНОВЕ 3D-ПРИНТИНГА С.А. Гриднева, К.О. Боровкова, О.С. Царёва	13-21
ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ КРИВОЛИНЕЙНЫХ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АРОК, СЖАТЫХ СИЛАМИ С ОДИНАКОВЫМИ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТАМИ Г.М. Маркосян, Д.В. Уразгильдеев	22-30
КОНСТРУКТИВНЫЕ СВОЙСТВА УСТОЙЧИВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ АЗИИ С. Туннвортн, Д.А. Шарпов	31-41
ТРАНСФОРМАЦИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ ПОСРЕДСТВОМ 3D-ПЕЧАТИ Е.Э. Саркисова	42-50

CONTENTS

INFLUENCE OF PRECIPITATION TYPES ON SLOPE STABILITY: ANALYSIS USING NUMERICAL MODELING T.N. Pham, A.N. Trieu, T.T. Dang	3-12
EFFICIENCY OF USING SMALL ARCHITECTURAL FORMS BASED ON 3D PRINTING S.A. Gridneva, K.O. Borovkova, O.S. Tsareva	13-21
ASSESSMENT OF THE STABILITY OF THIN-WALLED CURVED BAR ELEMENTS OF ARCHES COMPRESSED BY FORCES WITH THE IDENTICAL ECCENTRICITIES G.M. Markosyan, D.V. Urazgildeev	22-30
CONSTRUCTIVE PROPERTIES OF SUSTAINABLE BUILDING MATERIALS IN CONSTRUCTION FOR SOUTHEAST ASIA S. Thunnvortn, D.A. Sharapov	31-41
TRANSFORMATION OF THE CONSTRUCTION INDUSTRY THROUGH 3D PRINTING E.E. Sarkisova	42-50



УДК 699.83

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СКЛОНОВ: АНАЛИЗ С ПОМОЩЬЮ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Т.Н. Фам¹, А.Н. Триеу¹, Т.Т. Дан²

¹ Университет Туйлой, г. Ханой (Вьетнам)

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)

Аннотация. Оценка устойчивости склонов является важной проблемой в геотехнической инженерии, особенно в районах с высоким риском оползней из-за сильных или продолжительных дождей. В этом исследовании анализируется влияние различных типов осадков на устойчивость склонов посредством численного моделирования с использованием модулей SEEP/W и SLOPE/W в программном обеспечении Geostudio 2024. Моделируются три сценария дождя, включая: (1) периодический проливной дождь, (2) непрерывный морозящий дождь и (3) интенсивные ливни. Результаты показывают, что интенсивность и продолжительность осадков оказывают существенное влияние на поровое давление грунта и коэффициент запаса прочности (FOS) склонов. В частности, периодические проливные дожди приводят к снижению общей устойчивости из-за недостаточного восстановления состояния массива в засушливые периоды. Непрерывный морозящий дождь вызывает перенасыщение грунта и постепенно снижает прочность на сдвиг. Интенсивные ливни быстро ухудшают FOS, но система может восстановиться при условии эффективного водоотведения.

Ключевые слова: устойчивость склонов, осадки, поровое давление воды, коэффициент запаса прочности, Geostudio, численное моделирование.

Ссылка для цитирования: Фам Т.Н., Триеу А.Н., Дан Т.Т. Влияние различных видов атмосферных осадков на устойчивость склонов: анализ с помощью численного моделирования // Инженерные исследования. 2024. №5(20). С. 3-12. EDN: XZDYCQ

INFLUENCE OF PRECIPITATION TYPES ON SLOPE STABILITY: ANALYSIS USING NUMERICAL MODELING

T.N. Pham¹, A.N. Trieu¹, T.T. Dang²

¹ Thuyloi University, Ha Noi (Vietnam)

² Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. Slope stability is an important factor in geotechnical engineering, especially in areas with high risk of landslides due to heavy or prolonged rainfall. This study analyzes the effects of different rainfall types on slope stability through numerical simulation using SEEP/W and SLOPE/W modules in Geostudio 2024 software. Three rainfall scenarios are simulated, including: (1) intermittent heavy rainfall, (2) continuous drizzle, and (3) intense rainfall. The results show that rainfall intensity and duration have a significant effect on the pore water pressure and factor of safety (FOS) of slopes. Specifically, intermittent heavy rainfall leads to cumulative steady decline due to insufficient recovery of drought cycles. Prolonged rainfall causes soil supersaturation and gradually reduces the shear strength. Intense rainfall quickly destroys FOS, the system can recover under the condition of effective drainage.

Keywords: slope stability, precipitation, pore water pressure, factor of safety, Geostudio, numerical modeling.

For citation: Pham T.N., Trieu A.N., Dang T.T. Influence of precipitation types on slope stability: analysis using numerical modeling // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2024. No.5(20). Pp. 3-12. EDN: XZDYCQ

ВВЕДЕНИЕ

Устойчивость склонов является важным фактором в геотехнической инженерии, особенно в районах, подверженных развитию оползневых процессов. На устойчивость склонов влияют многие факторы, такие как свойства массива грунта, геологическое строение территории, растительность, атмосферные осадки, гидрологические и гидрогеологические условия и т.д. Среди перечисленных параметров осадки широко признаны одной из основных причин обрушения склонов, прежде всего в районах с частыми или продолжительными сильными дождями. Проникновение дождевой воды в массив грунта увеличивает поровое давление воды и уменьшает всасывание глинистой матрицы, что приводит к снижению прочности грунта на сдвиг и увеличению риска потери устойчивости и обрушения склонов.

Влияние выпадения осадков на устойчивость склонов широко изучалось ранее, но основное внимание уделялось влиянию интенсивности и продолжительности осадков. Многие исследования показали, что ливни высокой интенсивности могут быстро привести к обрушению склонов из-за водонасыщения грунтов, увеличения порового давления воды и снижения прочности грунта на сдвиг. Рахарджо и др. (2001) провели всесторонний анализ обрушений склонов из-за сильных дождей, подчеркнув, что быстрая инфильтрация может вызвать значительное увеличение порового давления воды, что приведет к неглубоким оползням [1]. Аналогичным образом, Нг и Ши (1998) исследовали влияние продолжительных дождей на устойчивость склонов, показав, что продолжительные периоды дождей могут привести к накоплению влаги в грунте, уменьшению всасывания грунта и увеличению вероятности оползней [2].

Помимо интенсивности дождя, важным фактором, влияющим на устойчивость склона, также считается его продолжительность. Исследования Годта и др. (2006) и Цая (2008) показывают, что продолжительные дожди, хотя и меньшей интенсивности, могут привести к формированию глубоких оползней, поскольку вода продолжает проникать в массив грунта [3, 4]. Эти исследования подчеркивают, что кумулятивный эффект осадков с течением времени так же важен, как и пиковая интенсивность, способствуя постепенному сползанию склона.

В недавних исследованиях также изучались меры по минимизации воздействия осадков на устойчивость склонов. Хуанг (2023) продемонстрировал, что микробное усиление может смягчить неблагоприятное воздействие инфильтрации ливневых вод на песчаные склоны, повышая стабильность за счет уменьшения областей отрицательного давления поровой жидкости [5]. Этот результат согласуется с данными Чжана и др. (2023), которые провели эксперименты с физической моделью, показавшие, что сильный дождь может вызвать механизмы разрушения выветриваемых базальтовых грунтов, подчеркивая важность понимания состава и структуры грунта в зависимости от осадков [6]. Криснанто и др. (2021) выделили два типа потери устойчивости склонов, основанные на изменениях уровня грунтовых вод во время осадков, показав, что значительное увеличение уровня грунтовых вод приводит к потере всасывания глинистого матрикса и появлению положительного давления воды, существенно влияющих на устойчивость склонов [7].

Кроме того, устойчивость ненасыщенных грунтов особенно чувствительна к изменениям интенсивности осадков. Ли и Ду (2023) обнаружили, что не глубоко залегающие грунты на склонах сильно реагируют на изменения интенсивности осадков, что позволяет предположить, что даже умеренные осадки могут существенно повлиять на устойчивость при некоторых условиях [8]. Озчелик и Сельчук (2022) с помощью параметрического анализа подтвердили, что увеличение интенсивности осадков коррелирует с уменьшением устойчивости склонов [9]. Чжао и др. (2022) исследовали совместное влияние давления поровой жидкости и силы тяжести в ненасыщенных грунтах, подтвердив мнение о том, что вызванные дождем изменения в динамике поровой жидкости важны для оценки устойчивости склонов [11].

Хотя эти исследования дают ценную информацию об общем влиянии осадков на устойчивость склонов, они в первую очередь рассматривают осадки как однородное и непрерывное явление, уделяя особое внимание экстремальным значениям интенсивности и интенсивности во времени. Этот подход чрезмерно упрощает сложные взаимодействия между количеством осадков и устойчивостью склонов, особенно если принять во внимание разнообразные режимы выпадения осадков в природе. Большинство современных исследований не делают различия между непрерывным сильным дождем, прерывистыми ливнями или продолжительным небольшим дождем - каждый из которых может иметь различное влияние на инфильтрацию и последующие изменения давления воды в порах грунта и его влажность. Указанное допущение является существенным ограничением. Различные условия выпадения осадков могут привести к отличным обстановкам водонасыщения грунтовых массивов, по-разному изменяя свойства грунтов.

Таким образом, цель данного исследования — устранить указанный выше недостаток путем изучения того, как различные режимы выпадения осадков влияют на устойчивость склонов. В частности, цель исследования состояла в анализе изменения давления поровой жидкости и влажности грунта при различных сценариях выпадения осадков и их влияние на устойчивость склонов. Численное моделирование в программе Geostudio позволяет обеспечить всестороннее понимание взаимосвязи между характером осадков и устойчивостью склонов, что важно для разработки более точных моделей прогнозирования устойчивости склонов и выбора методов их закрепления.

Численная модель в исследовании способна воспроизвести несколько сценариев выпадения атмосферных осадков, включая прерывистый дождь, непрерывный небольшой дождь и кратковременный сильный дождь. Ожидается, что результаты приведут к лучшему пониманию сложных взаимодействий между количеством осадков и устойчивостью склонов, что позволит, в конечном счете, разрабатывать технически обоснованные меры по снижению рисков развития оползней и других связанных с этим процессов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данные исследования. Место проведения исследования — провинция Йенбай, Северный Вьетнам. Провинция Йенбай, расположенная в Северном Вьетнаме, является подходящим местом для изучения влияния осадков на устойчивость склонов из-за ее гористой местности и подверженности сильным ливням, особенно в сезон дождей. В этом районе произошло множество оползней, часто вызванных экстремальными погодными явлениями, что делает его важным районом с точки зрения изучения рассматриваемой проблемы.

Рельеф: Эта территория характеризуется крутыми склонами высотой от 200 до 2000 метров над уровнем моря. Крутой рельеф в сочетании с обильными дождями создает условия, в которых высока вероятность формирования оползней (рис.1).

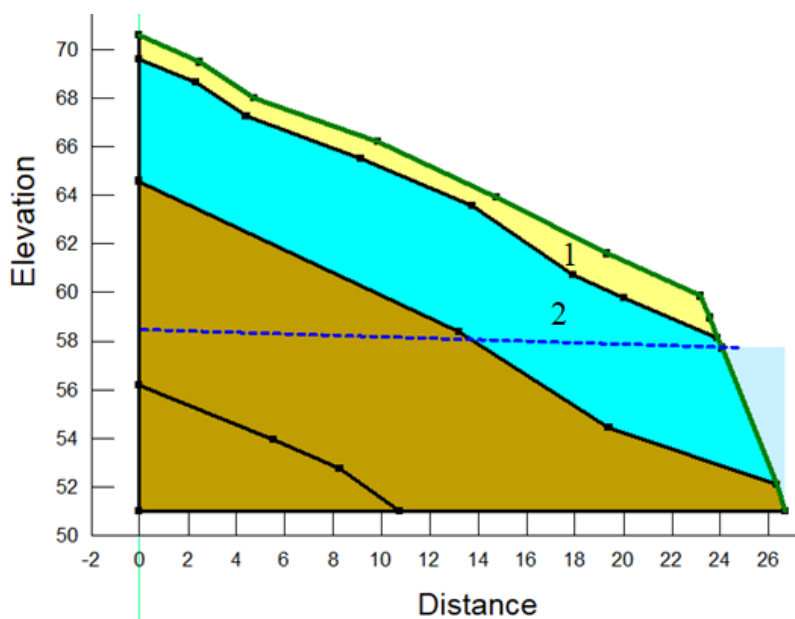


Рис. 1. Типичный инженерно-геологический разрез в районе провинция Йенбай, использованный в настоящем исследовании

Fig. 1. Typical cross-section used in the study

Как правило, в инженерно-геологическом разрезе преобладают глинистые илы и выветрившиеся породы. Низкая водопроницаемость и высокая пластичность грунтов являются основными факторами, влияющими на устойчивость склонов, особенно в условиях водонасыщения. Физико-механические характеристики слоев грунтов представлены в табл.1.

Таблица 1. Физико-механические характеристики слоев массива грунта
Table 1. Physical and mechanical properties of soil layers

Характеристики	Обозначение	Слой 1	Слой 2
Удельный вес влажного грунта, кН/м ³	γ_w	16,95	17,00
Удельный вес водонасыщенного грунта, кН/м ³	γ_s	17,58	17,66
Угол внутреннего трения, градус	φ	18,29	24,36
Сцепление, кН/м ²	c	20,20	18,50
Коэффициент фильтрации, см/с	k	$9,59 \times 10^{-6}$	$3,0 \times 10^{-5}$

В Йенбай наблюдается отчетливый сезон муссонов с мая по октябрь, в течение которого на этот район выпадает большая часть годового количества осадков. Во время экстремальных явлений интенсивность осадков может достигать 300 мм/день. В регионе наблюдаются разнообразные режимы выпадения осадков, включая непрерывный морозящий дождь, периодический проливной дождь и короткие интенсивные ливни. Как было указано ранее, такие условия выпадения осадков позволяют оценить влияние различных типов осадков на устойчивость склонов.

Метод исследования. Влияние осадков оценивалось по изменению распределения порового давления воды на склоне [12, 17-19]. Для анализа устойчивости склонов использовался детерминированная модель устойчивости склонов путем интеграции двух модулей SEEP/W и SLOPE/W в программном обеспечении GEOSTUDIO 2024.

Для оценки устойчивости склонов были предприняты три шага: 1) модуль SEEP/W использовался для моделирования порового давления воды; 2) затем модуль SLOPE/W применялся для определения критической поверхности скольжения и расчета коэффициента запаса прочности (FOS) в переходных условиях PWP.

Seep/w использует закон Дарси и уравнения потока для моделирования фильтрации жидкости в грунте. Указанный закон представляет собой линейную модель, которая описывает взаимосвязь между скоростью потока через водонасыщенный слой грунта и гидравлическим градиентом, действующим в этом слое [13-15]:

$$V = q/A = kJ, \quad (1)$$

где:

q – удельный расход фильтрующегося потока;

A – площадь поперечного сечения фильтрующегося потока;

k – коэффициент фильтрации;

J – гидравлический уклон;

V – скорость фильтрационного потока.

Общее дифференциальное уравнение двумерной фильтрации можно выразить следующим образом (2):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t}, \quad (2)$$

где:

H – напор фильтрующегося потока;

k_x – коэффициент фильтрации в направлении x ;

k_y – коэффициент фильтрации по направлению y ;

Q – расход фильтрующегося потока;

θ – гидратированный объем;

t – время.

Для анализа устойчивости модуль Slope/w использует упрощенный метод Бишоп, чтобы найти коэффициент запаса прочности (FOS). Этот метод учитывает нормальную силу между слоями грунтов, игнорируя при этом касательную силу между ними ($X=0$). Чтобы вычислить нормальную силу у основания каждой поверхности среза, Бишоп предложил новое уравнение (3), складывая вертикальные касательные [20]:

$$FS = \frac{1}{\sum W \sin \alpha} \sum \left[\frac{c\beta + W \tan \varphi - \frac{c\beta}{FS} \sin \alpha \tan \varphi}{m_\alpha} \right], \quad (3)$$

где:

c - сцепление;

φ - угол внутреннего трения;

W - вес полосы земли;

β - геометрические параметры;

α - наклон среза.

Сценарий моделирования. В регионе наблюдаются разнообразные режимы выпадения осадков, включая непрерывный морозящий дождь, периодический проливной дождь и короткие интенсивные ливни. В статье проведены расчеты для 3 сценариев:

Сценарий 1. Периодический проливной дождь со скоростью 100 мм/ч в течение 2 часов, за которым следует 4-часовой засушливый период, повторяющийся в течение 10 дней.

Сценарий 2. Непрерывный морозящий дождь со скоростью 10 мм/час в течение 72 часов подряд.

Сценарий 3. Короткие интенсивные ливни, представляющие собой сильный дождь за короткий период времени, 300 мм за 12 часов. На рис.2 представлена иллюстрация моделирования непрерывного морозящего дождя для сценария 2.

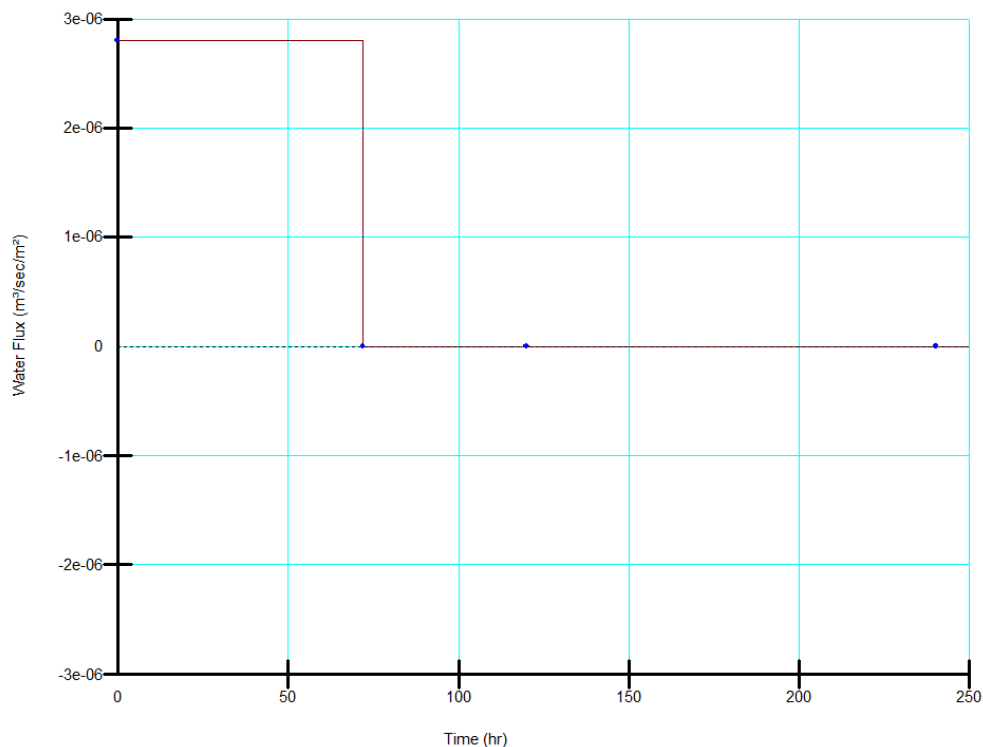


Рис. 2. Иллюстрация моделирования непрерывного морозящего дождя для сценария 2
Fig. 2. Illustration of continuous drizzle simulation for scenario 2

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

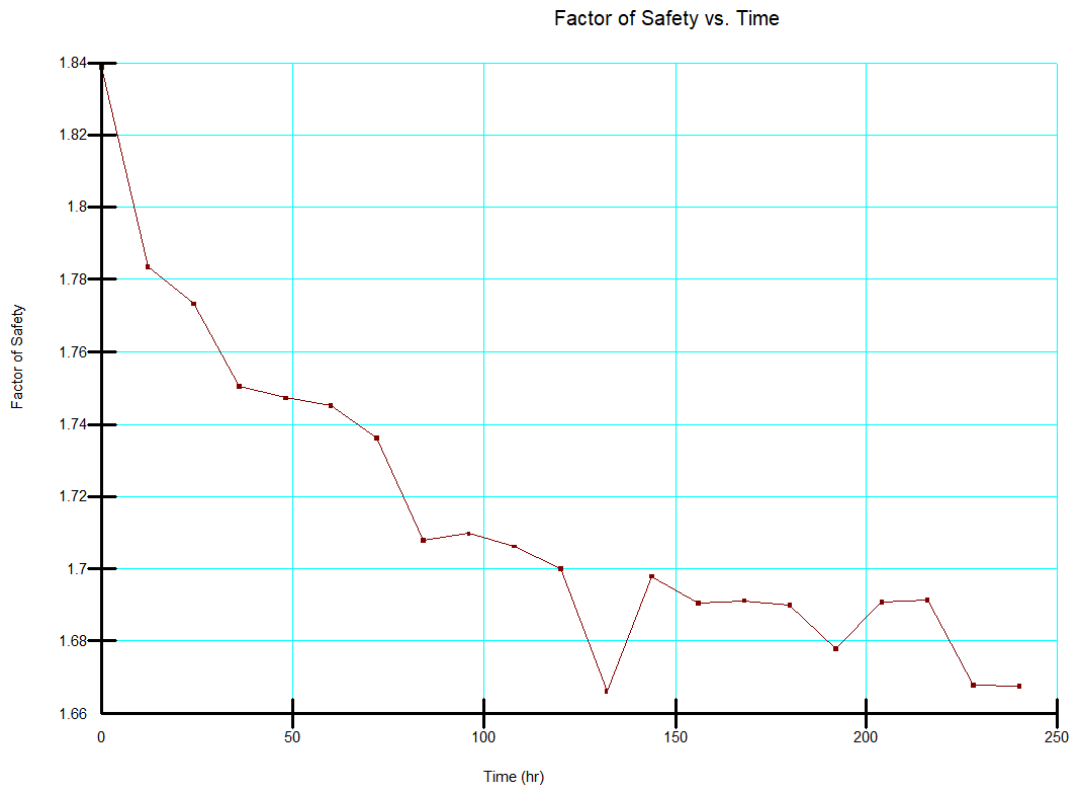


Рис. 3. Результаты расчета коэффициента запаса прочности для сценария 1
Fig. Calculation result of the factor of safety for scenario 1

Для сценария 1 коэффициент безопасности (FOS) постепенно снижается с течением времени, отражая негативное влияние периодических сильных дождей на стабильность системы (рис. 3). На ранних стадиях (0–50 часов) FOS резко снизился с 1,84 до 1,74, главным образом за счет инфильтрации воды, увеличивающей поровое давление, вызывающей снижение стабилизирующей силы. На промежуточной фазе (50–150 часов) наблюдается более медленный темп снижения, поскольку система начинает адаптироваться к циклу дождей и засухи. Однако восстановления в засушливые периоды (4 часа) было недостаточно, чтобы обратить вспять совокупное воздействие дождей, в результате чего FOS упал примерно до 1,70. На заключительном этапе (150–240 ч) FOS незначительно колебался и стабилизировался на низком уровне (1,68–1,70), что свидетельствует о достижении в системе временного равновесия между инфильтрацией и дренажом воды.

Результаты также показывают, что период высыхания массива между дождями недостаточно велик, чтобы снизить поровое давление и восстановить исходные условия. Повторяющиеся циклы выпадения осадков и засухи значительно ухудшают общую устойчивость изучаемой природной системы, подчеркивая необходимость эффективных мер по управлению водными ресурсами для минимизации рисков во время периодических сильных дождей.

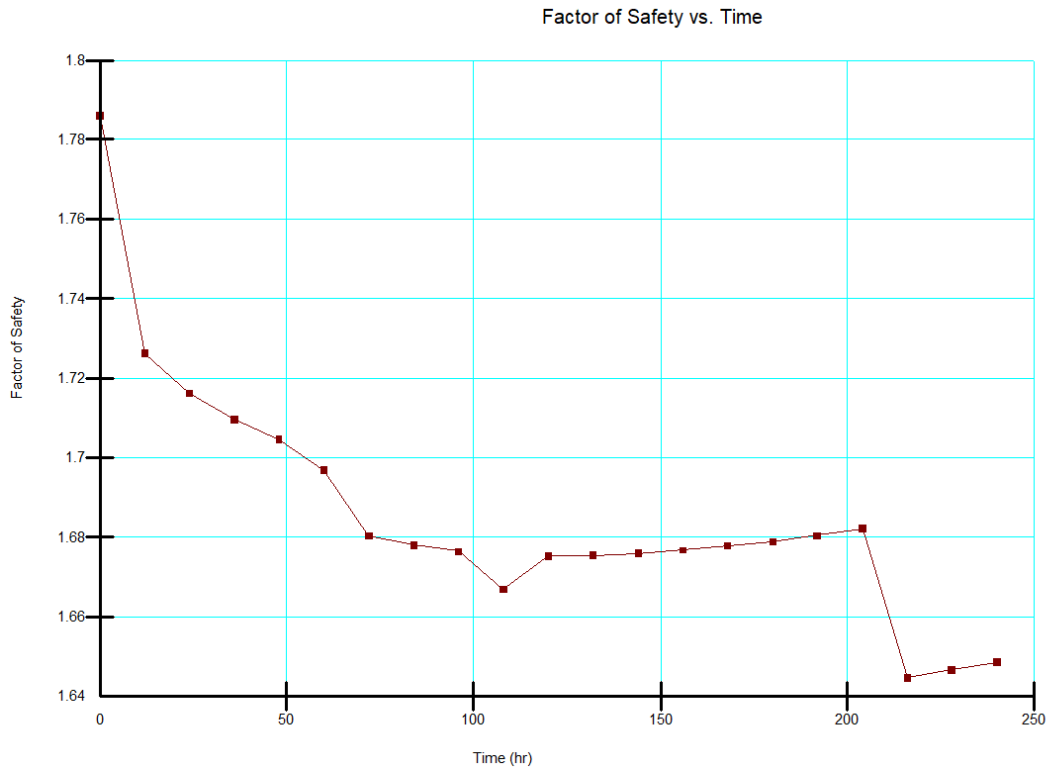


Рис. 4. Результаты расчета коэффициента запаса для сценария 2
Fig. 4. Calculation result of the factor of safety for scenario 2

Для сценария 2 при воздействии на склон непрерывного морозящего дождя малой интенсивности, получается явное снижение коэффициента запаса прочности (FOS) (рис.4). Первоначально FOS резко снизился, затем временно стабилизировался, а затем внезапно снизился на заключительном этапе, отражая совокупный эффект просачивания воды в грунт, увеличения порового давления и снижения сопротивления массива сдвигу.

На ранних стадиях FOS снизился с 1,78 до 1,68, главным образом, за счет глубокого проникновения дождевой воды в грунт, вызывающего повышение порового давления и снижение начальной устойчивости, особенно в условиях плохого дренажа. В промежуточной фазе (50–200 ч) наблюдалась небольшая стабилизация FOS около 1,66–1,68, что соответствует временное равновесие между инфильтрацией и дренажом воды. Однако стабильный уровень все еще значительно ниже первоначального из-за кумулятивного воздействия дождевой воды. На заключительном этапе FOS внезапно падает ниже 1,65, возможно, из-за водонасыщения и местной потери устойчивости, что увеличивает риск формирования оползня, если не будут приняты меры по закреплению склона.

Результаты анализа показывают, что непрерывный дождь, даже небольшой интенсивности, может со временем оказать серьезное влияние на устойчивость склона. Необходимы эффективные меры водоотведения (дренажа) и контроль порового давления, чтобы свести к минимуму риск потери устойчивости во время продолжительных дождей.

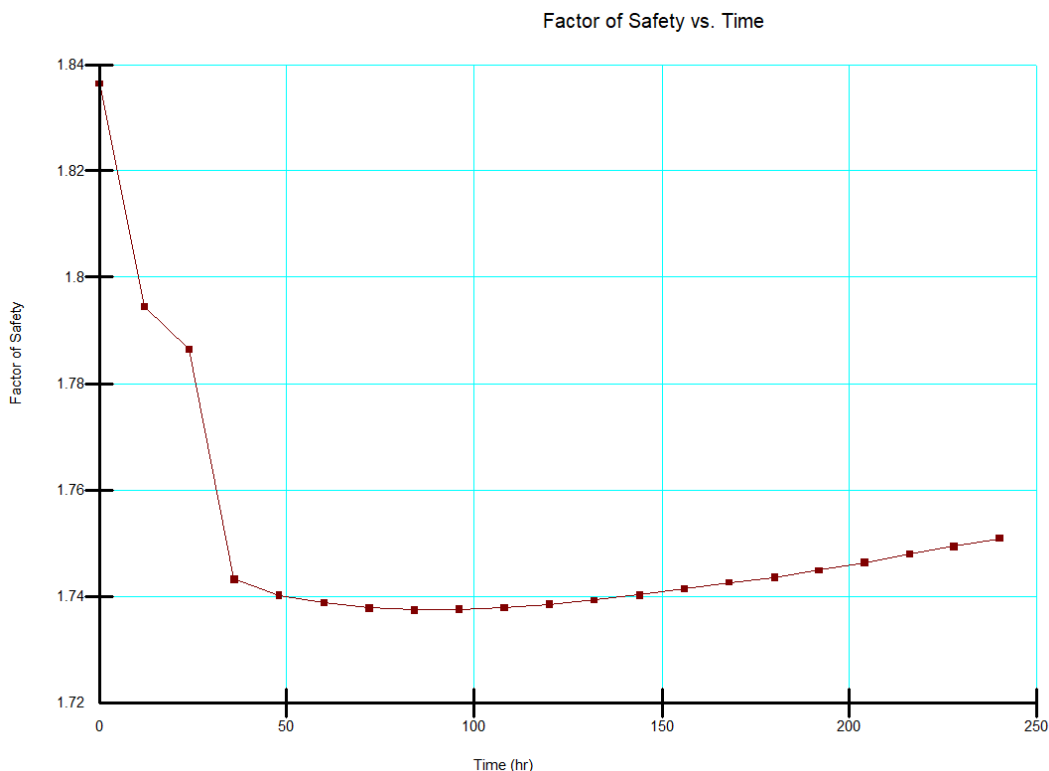


Рис. 5. Результаты расчета коэффициента запаса для сценария 3
Fig.5. Calculation result of the factor of safety for scenario 3

Полученные результаты показывают, что фактор безопасности (FOS) резко снижался на ранних стадиях воздействия интенсивных ливней, затем стабилизировался на низком уровне и постепенно восстанавливался на заключительном этапе (рис.5). Эта тенденция демонстрирует немедленное воздействие краткосрочных сильных дождей на стабильность системы с возможностью восстановления после того, как воздействие утихнет.

В течение первых 50 часов FOS быстро снизился с 1,84 до 1,74 из-за резкого увеличения порового давления из-за быстрой инфильтрации воды, снижающей сопротивление грунта сдвигу и вызывающей нестабильность. По истечении этого периода FOS оставался стабильным на уровне 1,72–1,74, показывая, что система достигла временного баланса между инфильтрацией воды и поровым давлением. Однако низкий стабильный уровень на данном этапе по-прежнему представляет собой риск уязвимости к другим дождям или дополнительным нагрузкам.

Начиная со 150 часа, FOS медленно увеличивался с 1,74 до почти 1,76, отражая процесс дренирования и снижение порового давления с течением времени. Это показывает, что система способна к самовосстановлению, хотя этот процесс зависит от времени и эффективности дренажа.

Результаты показывают, что интенсивные ливни могут вызвать быструю потерю устойчивости, но система способна постепенно восстанавливаться, если эффективно отводить лишнюю воду. Это подчеркивает роль мер по управлению водными ресурсами в минимизации рисков и обеспечении безопасности системы во время кратковременных сильных дождей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этом исследовании было проанализировано влияние различных типов осадков на устойчивость склонов посредством численного моделирования с использованием Geostudio 2024. Результаты показывают, что интенсивность и продолжительность осадков играют важную роль во влиянии на устойчивость склона, при этом эффекты разных типов осадков совершенно разные.

При **периодическом проливном дожде** быстрое проникновение дождевой воды приводит к увеличению порового давления воды, снижая прочность грунта на сдвиг. Попеременный сухой цикл недостаточен для восстановления исходного состояния, что приводит с течением времени к значительному снижению коэффициента запаса прочности (FOS). Это подчеркивает риск кумулятивной нестабильности в условиях частых периодических дождей.

В случае **непрерывного морозящего дождя**, даже несмотря на то, что интенсивность осадков

невелика, накопление влаги в грунте с течением времени все равно приводит к постепенному снижению FOS. Этот результат показывает, что продолжительный дождь может вызвать местное водонасыщение, постепенно ослабляя сопротивление сдвигу грунта и увеличивая риск потери устойчивости склонов, особенно на плохо дренированных участках.

В случае **интенсивных ливней** быстрое снижение FOS на ранних стадиях отражает непосредственный эффект кратковременного сильного дождя. Однако, если дренажная система работает эффективно, последующая стабилизация может свести к минимуму риск оползней.

Представленные результаты подтверждают, что учет различных режимов выпадения осадков необходим для более точной оценки устойчивости склонов в реальных условиях. В частности, в исследовании подчеркивается важная роль мер по управлению водными ресурсами, таких как проектирование дренажной системы и снижение порового давления воды, чтобы минимизировать риск нестабильности склонов из-за осадков.

Это исследование обеспечивает важную научную основу для разработки моделей прогнозирования и эффективных мер управления земельными ресурсами в контексте усиливающегося изменения климата. Расширение проведенных исследований на других инженерно-геологических условиях и ландшафты будет способствовать дальнейшему выяснению сложных взаимосвязей между количеством осадков и устойчивостью склонов.

В дальнейшем планируется выполнить обратный анализ потери устойчивости склонов, зафиксированной *in situ*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rahardjo H., Li X. W., Toll D. G., Leong E. C. The effect of antecedent rainfall on slope stability // *Unsaturated soil concepts and their application in geotechnical practice*. 2001. С. 371–399.
2. Ng C. W. W., Shi Q. A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage // *Computers and geotechnics*. 1998. Т. 22. № 1. С. 1–28.
3. Godt J. W., Baum R. L., Chleborad A. F. Rainfall characteristics for shallow landsliding in Seattle, Washington, USA // *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*. 2006. Т. 31. № 1. С. 97–110.
4. Tsai T. L. The influence of rainstorm pattern on shallow landslide // *Environmental Geology*. 2008. Т. 53. С. 1563–1569.
5. Huang M., Zhang Y., Hu J., Hei Y., Xu Z., Su J. Experimental Study on Pore Pressure Variation and Erosion Stability of Sandy Slope Model under MICP. 2023.
6. Zhang Q., Luo Z., Chen Y., Wang Z. Physical Model Experiments on Failure Mechanism on Slopes of Weathered Basalt Soils during Heavy Rainfall Events // *Materials*. 2023. Т. 16. № 2. С. 832.
7. Krisnanto S., Rahardjo H., Kartiko R. D., Satyanaga A., Nugroho J., Mulyanto N., Rachma S. N. Characteristics of rainfall-induced slope instability in Cisokan region, Indonesia // *Journal of Engineering and Technological Sciences*. 2021.
8. He Y., Li B., Du X. Soil slope instability mechanism and treatment measures under rainfall - A case study of a slope in Yunda Road // *Sustainability*. 2023. Т. 15. № 2. С. 1287.
9. Özçelik F. V., Selçuk M. E. Parametric Analysis of Factors that Affects the Rainfall Induced Slope Stability // *Turkish Journal of Geosciences*. 2022. Т. 3. № 2. С. 49–57.
10. Zhao N., Lu H., Zhang R. The Coupling Effect of Pore Water Pressure and Pore Water Gravity in Unsaturated Soils under Rainfall Condition and Its Influence on Slope Stability // *Geofluids*. 2022. Т. 2022. № 1. С. 9492514.
11. Satyanaga A., Rahardjo H. Role of unsaturated soil properties in the development of slope susceptibility map // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*. 2022. Т. 175. № 3. С. 276–288.
12. Jassam M. G., Abdulrazzaq S. S., Khalaf W. D. Seepage characteristics analysis through homogeneous earth dams using theoretical model of SEEP/W program // *J. Crit. Rev.* 2020. Т. 7. С. 5984–5996.
13. Schweizer B. Darcy's law and groundwater flow modelling. 2015.
14. Knappett J., Craig R. F. Craig's soil mechanics. CRC press. 2019.
15. Fredlund D. G. The stability of slopes with negative pore-water pressures. 1995.
16. Fredlund D. G., Morgenstern N. R., Widger R. A. The shear strength of unsaturated soils // *Canadian geotechnical journal*. 1978. Т. 15. № 3. С. 313–321.
17. Fredlund D. G., Rahardjo H. An overview of unsaturated soil behaviour // *Geotechnical special publication*. 1993. С. 1–1.
18. Fredlund M. D., Sillers W. S., Fredlund D. G., Wilson G. W. Design of a knowledge-based system for unsaturated soil properties. 1996. С. 659–677.
19. Petterson K. E. The early history of circular sliding surfaces // *Geotechnique*. 1955. Т. 5. № 4. С. 275–296.
20. Bishop A. W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes // *Geotechnique*. 1955. Т. 5. № 1. С. 7–17.

ОБ АВТОРАХ

Нгок Тхинь Фам – Университет Туйлой, 175 Тай Сон, Донг Да, Ханой (Вьетнам). E-mail: thinhtls@tlu.edu.vn

Ань Нгок Триеу – Университет Туйлой, 175 Тай Сон, Донг Да, Ханой (Вьетнам)

Тьу Тхао Данг – студент. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: dangthuthao90@gmail.com

ABOUT THE AUTHORS

Thinh Ngoc Pham – Thuyloi University, 175 Tay Son, Dong Da, Ha Noi (Vietnam). E-mail: thinhtls@tlu.edu.vn

Anh Ngoc Trieu – Thuyloi University, 175 Tay Son, Dong Da, Ha Noi (Vietnam)

Thu Thao Dang – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: dangthuthao90@gmail.com

УДК 727

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МАЛЫХ АРХИТЕКТУРНЫХ ФОРМ НА ОСНОВЕ 3D-ПРИНТИНГА

С.А. Гриднева, К.О. Боровкова, О.С. Царёва

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

Аннотация. Дается анализ выбора и экономической эффективности использования малых архитектурных форм (МДФ), напечатанных на 3D-принтере, на примере благоустройства территории Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (Россия). Обосновывается актуальность использования 3D-печати в строительстве и подчеркивает важность МДФов для формирования городской среды, в том числе и для благоустройства территорий университетов и особенно территорий формирующие ансамбли являющимися объектами культурного наследия. Обсуждаются преимущества 3D-печати, такие как возможность создавать сложные формы и структуры, сокращение времени производства, экономическая эффективность. Также описываются ограничения 3D-печати, связанные с размерами и материалами и необходимостью послепечатной обработки. Рассматриваются роль и значение МДФов в городской среде. Приводятся примеры типичных МДФов для университетских территорий, обсуждается влияние данных элементов на формирование стимулирующей среды для учебной и культурной деятельности. В заключительной части работы проводится сравнительный анализ стоимости создания МДФов с использованием 3D-печати и традиционных методов, обосновывая потенциальную экономическую выгоду от применения новых технологий. Полученные результаты могут быть полезны для архитекторов, градостроителей и всех заинтересованных сторон, исследующих современные подходы к благоустройству и дизайну городской среды.

Ключевые слова: малые архитектурные формы, 3D-печать, городская среда, благоустройство территории университетов, общественные пространства, бетонный 3D-принтер, инновационные технологии.

Ссылка для цитирования: Гриднева С.А., Боровкова К.О., Царёва О.С. Эффективность применения малых архитектурных форм на основе 3D-принтинга // Инженерные исследования. 2024. №5(20). С. 13-21. EDN: XZZZYU

EFFICIENCY OF USING SMALL ARCHITECTURAL FORMS BASED ON 3D PRINTING

S.A. Gridneva, K.O. Borovkova, O.S. Tsareva

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

Abstract. This article is a study devoted to the analysis of the choice and economic efficiency of using small architectural forms (SAF) printed on a 3D printer, using the example of landscaping of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Russia). The article substantiates the relevance of the use of 3D printing in construction and emphasizes the importance of SAF for the formation of the urban environment, including for the improvement of university territories. The advantages of 3D printing are discussed, such as the ability to create complex shapes and structures, reduce production time, and economic efficiency. The limitations of 3D printing related to dimensions and materials and the need for post-printing are also described. The role and importance of the SAF in the urban environment are considered. Examples of typical SAF for university territories are given, and the influence of these elements on the formation of a stimulating environment for educational and cultural activities is discussed. In the final part of the article, a comparative analysis of the cost of creating an SAF using 3D printing and traditional methods is carried out, justifying the potential economic benefits from the use of new technologies. The results obtained can be useful for architects, urban planners and all interested parties exploring modern approaches to urban landscaping and design.

Keywords: small architectural forms, 3D printing, urban environment, landscaping of the university grounds, public spaces, concrete 3D printer, innovative technologies.

For citation: Gridneva S.A., Borovkova K.O., Tsareva O.S. Efficiency of using small architectural forms based on 3D printing // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2024. No.5(20). Pp. 13-21. EDN: XZZZYU

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире строительство и благоустройство общественных пространств становятся все более технологичными и инновационными благодаря использованию передовых технологий, таких как трехмерная печать. В России и за границей технология 3D-печати уже нашла широкое применение в строительстве жилых домов, мостов, архитектурных элементов и других объектов инфраструктуры. 3D-принтеры обеспечивают экономию ресурсов и времени, а также повышают производительность, что делает строительство быстрым, экологичным и более доступным [1].

Малые архитектурные формы (МАФ) – архитектурные сооружения, несущие вспомогательный характер, служат акцентом-ориентиром и дополняют общую архитектурную композицию. Понятие "малые архитектурные формы" охватывает разнообразные элементы, такие как скамейки, уличные фонари, велосипедные стойки, беседки, контейнерные кафе и другие небольшие сооружения, предназначенные для удобства и комфорта горожан.

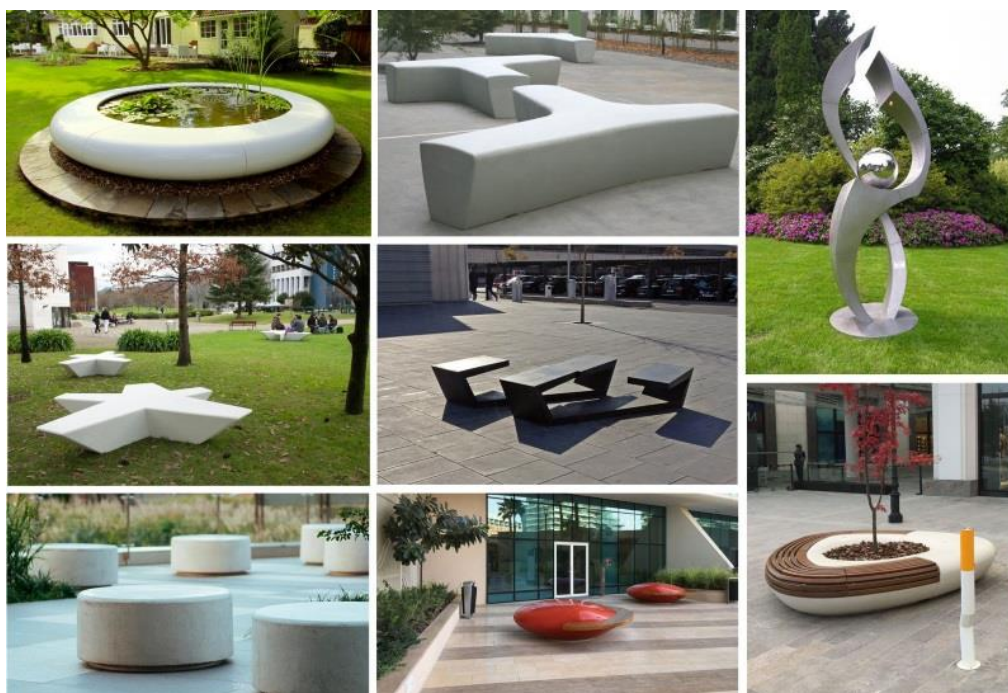


Рис. 1. Примеры МАФ в городской среде
Fig.1. Examples of small architectural forms in the urban environment

Современная практика градостроительства показывает, какую существенную роль в формировании архитектуры города играет широкое разнообразие малых архитектурных форм различного назначения. Малые архитектурные формы практически постоянно находятся в поле зрения человека, воздействуя на формирование его эстетического вкуса, поэтому они должны отвечать высоким требованиям современного художественного оформления и иметь качественную отделку [2-3]. В некоторых случаях малым архитектурным формам отводится ответственная роль связующего звена между значительными искусственными сооружениями и их природным окружением, они придают индивидуальность планировочной организации территории, создают своеобразный ландшафт. Все используемые в благоустройстве участка отдельные компоненты должны отвечать единому замыслу организации пространственной среды, учитывающему природно-климатические условия и народные традиции [11].

МАФы выполняют ряд функций:

- обеспечение удобства и доступности городских пространств. МАФ призваны сделать город более комфортным для его жителей.
- вклад в эстетику. Во время выполнения самых приземлённых задач (выбросить мусор в урну или воспользоваться фонтаном для питьевой воды) люди могут полюбоваться элементами благоустройства города и оценить их эстетичность.
- социокультурное влияние. Многие МАФ стимулируют социальную интеграцию, помогая горожанам больше общаться. Это, прежде всего, беседки, павильоны и скамейки, где люди могут отдыхать, знакомиться и беседовать.

– улучшение экологии. Малые архитектурные формы, дополненные растительностью, не только украшают город, но и позволяют его жителям дышать более чистым воздухом [12].

Понимание и анализ роли МАФ в городской среде являются важными аспектами разработки стратегий управления городским пространством и создания комфортной и функциональной среды для проживания и работы горожан. Внимание к этим элементам позволит оптимизировать процессы благоустройства и обеспечить устойчивое развитие городской инфраструктуры.

Материалы, применяемые при формировании малых архитектурных объектов, играют значительную роль в их эстетике и внешнем виде. Современные технологии, программные комплексы и разнообразие материалов позволяют создавать выразительные композиции с различными текстурами и характерами поверхностей, что открывает широкие возможности для дизайнеров и архитекторов в создании инновационных и функциональных малых форм [4-5].

Проектирование и реконструкция (реставрация) университетских кампусов – это сложный процесс, который требует учета современных стандартов и структурного развития городской среды. Особое внимание следует уделить малым архитектурным формам при организации таких территорий. Различные элементы, такие как скамейки, лавки, арт-объекты и другие, должны гармонично сочетаться с общей концепцией кампуса, создавая уютную и приятную атмосферу [6]. В зависимости от предназначения малые архитектурные формы могут быть разделены на несколько категорий. Например, декоративные элементы, вроде скульптур и фонтанов, добавляют особое очарование ландшафту кампуса, в то время как универсальные формы, такие как цветочные вазоны и скамейки, обеспечивают комфортное и функциональное пространство для студентов и преподавателей. Игровые и спортивные элементы, такие как качели и горки, предоставляют возможности для активного отдыха и занятий спортом [7].

Одним из ключевых аспектов, который необходимо учитывать при использовании 3D-печати для создания малых архитектурных форм, являются трудозатраты на сам процесс печати. Вопросы, связанные с выбором материалов, подготовкой моделей к печати, настройкой оборудования и контролем качества изделий, играют важную роль в определении эффективности и экономической целесообразности данного метода производства.

В современной архитектурной практике технологии 3D-печати привлекают все большее внимание благодаря своей потенциальной способности трансформировать процесс проектирования и производства. Они позволяют обеспечить гибкость дизайна, сокращение времени производства, экономическую выгоду и возможность индивидуализации, что делает их подходящими для использования в создании архитектурных элементов.

Одним из главных преимуществ 3D-печати является ее способность создавать сложные формы и структуры, которые трудно или невозможно воспроизвести с помощью традиционных методов производства [13]. Это открывает новые возможности для архитекторов в создании инновационных и уникальных дизайнов, а также позволяет адаптировать архитектурные элементы к конкретным потребностям и требованиям заказчика. Колонна, ротонда, свод павильона, плита перекрытия, строительные леса, искусственные рифы, предметы внутреннего интерьера, узлы соединения и элементы конструкций – всё это лишь малая часть того, что можно создать с помощью 3D-печати [9,25].

Кроме того, использование 3D-печати позволяет существенно сократить время на производство архитектурных элементов. Благодаря автоматизации процесса и возможности печатать несколько элементов одновременно, можно значительно ускорить процесс создания конструкций, что особенно важно при выполнении проектов с ограниченными сроками [16].

Экономическая выгода также является важным аспектом использования 3D-печати в архитектуре. В некоторых случаях она может быть более экономически выгодной по сравнению с традиционными методами производства, особенно при создании небольших серий или уникальных элементов. Это связано с возможностью оптимизации материальных затрат и снижения затрат на трудовые ресурсы.

Однако, несмотря на все преимущества, использование 3D-печати в архитектуре также имеет определенные ограничения. В частности, ограничения размеров и материалов могут ограничить применение данной технологии в определенных условиях эксплуатации [17,19-21]. Кроме того, качество поверхности и точность печати могут варьироваться в зависимости от используемой технологии и параметров печати, что может потребовать дополнительной послепечатной обработки [10].

Несмотря на свои ограничения, технология 3D-печати представляет собой мощный инструмент для архитекторов, открывающий новые возможности в области дизайна и производства архитектурных элементов. Однако для успешной реализации проектов необходимо учитывать как преимущества, так и

ограничения данной технологии, а также подходить к их преодолению с учетом конкретных требований и особенностей проекта.

Цель исследования – выявить экономическую эффективность применения 3D-печати в создании МАФ для благоустройства территории Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (Россия) вблизи Гидротехнического корпуса-2 в сравнении с традиционными подходами к их изготовлению. Задачи исследования: определить наиболее подходящие типы малых архитектурных форм для благоустройства территории СПбПУ вблизи Гидрокорпуса-2, и произвести расчёт стоимости печати определенного типа МАФ на бетонном 3D-принтере и сравнить её с ценой готовой продукции.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методы исследования:

1) анализ - разложение предмета или описываемого явления на признаки и свойства, чтобы изучить его более конкретно. В работе выявлены различные функции МАФ и примеры типичных МАФ для университетских территорий. Кроме того, будут рассмотрены существующие подходы к благоустройству университетских территорий и подобран подходящий для Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (Россия).

2) сравнение: сопоставление двух или нескольких объектов исследования по определенному признаку. Так будет произведен расчёт стоимости печати скамейки на бетонном 3D-принтере. Полученное число будет сравниваться со стоимостью готовой скамейки.

ПРИМЕРЫ ТИПИЧНЫХ МАЛЫХ АРХИТЕКТУРНЫХ ФОРМ ДЛЯ УНИВЕРСИТЕТСКИХ ТЕРРИТОРИЙ

В университетской среде малые архитектурные формы играют особенно важную роль, поскольку они не только способствуют созданию благоприятной атмосферы для студентов, преподавателей и посетителей, но и отражают культурные и образовательные ценности учебного заведения. Примеры типичных МАФ для университетских территорий могут включать в себя:

- скульптуры и инсталляции, отражающие историю и дух университета, а также его академические и культурные достижения.
- павильоны и киоски, предоставляющие пространство для общения, отдыха и проведения мероприятий на открытом воздухе.
- уличное освещение, обеспечивающее безопасность и комфортные условия вечером и ночью.
- удобные скамейки и площадки для отдыха и работы студентов и преподавателей.
- велопарковки и элементы инфраструктуры для стимулирования экологических видов транспорта.
- ландшафтные композиции, способствующие созданию природного уюта и гармонии на территории университета.

Эти элементы не только улучшают визуальное и функциональное оформление университетской территории, но и способствуют формированию приятной и стимулирующей среды для академической и культурной деятельности, обогащая образовательный опыт студентов и сотрудников университета.

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К БЛАГОУСТРОЙСТВУ УНИВЕРСИТЕТСКИХ ТЕРРИТОРИЙ. ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАЛЫХ АРХИТЕКТУРНЫХ ФОРМ ДЛЯ УНИВЕРСИТЕТОВ

Существует несколько подходов к благоустройству университетских территорий, каждый из которых направлен на создание функциональных и привлекательных пространств.

Один из подходов заключается в создании университетских кампусов, где основное внимание уделяется интеграции архитектурных элементов с природным окружением. Такие кампусы обычно включают в себя ландшафтные композиции, парки, аллеи, фонтаны и другие элементы, которые способствуют созданию уютной и гармоничной атмосферы.

Другой подход основан на активном использовании современных технологий и инновационных архитектурных решений для создания современных и функциональных пространств. Сюда входит использование малых архитектурных форм, таких как павильоны, скульптуры, арки, скамейки, освещение и другие элементы, которые не только обогащают внешний облик территории, но и предоставляют удобные и практичные возможности для отдыха, работы и общения.

На территории вблизи Гидрокорпуса-2 из элементов благоустройства присутствуют только две мусорные урны и одна скамейка непосредственно перед входом в здание.



Рис. 2. Благоустройство территории вблизи Гидротехнического корпуса-2
Fig.2. Landscaping of the HydroCorpus-2

Поэтому использование МАФ будут актуальны для создания комфортной, функциональной и привлекательной среды для всех участников учебного процесса. Кроме того, МАФ, напечатанные на бетонном 3D-принтере, отлично впишутся в архитектуру учебного корпуса.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сравнительный анализ стоимости создания малых архитектурных форм с использованием 3D-печати и традиционных методов является важным аспектом при рассмотрении экономической эффективности применения технологии 3D-печати в архитектурном проектировании и строительстве.

Традиционные методы создания малых архитектурных форм обычно включают в себя процесс изготовления с использованием стандартных материалов, таких как бетон, металл, дерево или камень [13]. Этот процесс требует физического формования и обработки материалов, что может быть трудоемким и затратным с точки зрения рабочего времени и материалов.

С другой стороны, технология 3D-печати позволяет создавать малые архитектурные формы с помощью нанесения материала по слоям на основе цифровой модели. Этот процесс обычно менее трудоемкий и требует меньше физического труда, так как большая часть работы выполняется автоматически благодаря программному управлению процессом печати.

Рассмотрим пример расчета.

Для расчёта стоимости затрат на печать на строительном 3D-принтере необходимо учитывать несколько факторов, таких как стоимость материалов, энергозатраты и износ оборудования. Рассмотрим пример печати цилиндрической скамейки на 3D-принтере.

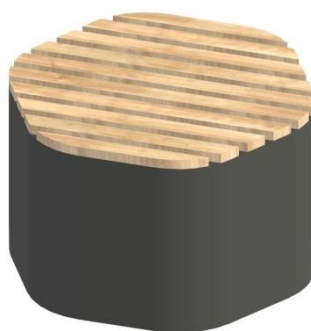


Рис. 3. Модель скамейки в Revit
Fig.3. The bench model in Revit

Затраты на материалы:

Необходимо определить объем материала, который будет использован для печати скамейки. Для полого цилиндра объем можно вычислить по формуле (1).

$$Q = P \cdot t \cdot V = \pi \cdot h \cdot (R^2 - r^2) \quad (1)$$

где V – объем, м^3 ,

π – число Пи (3,14),

h – высота цилиндра, м,

R – внешний радиус (радиус внешней части скамейки), м,

r – внутренний радиус (радиус внутренней пустоты скамейки, если она полая), м.

Высота скамейки (h) = 45 см = 0,45 м.

Внешний радиус (R) = 50 см = 0,5 м.

Внутренний радиус (r) = 47 см = 0,47 м (толщина стенок скамейки составляет 0,03 м).

Объем скамейки:

$$V = 3.14 \cdot 0.45 \cdot (0.5^2 - 0.47^2) = 0.1298 \text{ м}^3$$

Исследования показывают, что наиболее распространенными материалами, используемыми в 3D-печати, являются: цементирующие материалы, полимерные материалы и металлические материалы. Полимерные материалы обычно используются в эстетических целях из-за отсутствия у них структурных свойств. Металлические материалы также популярны в качестве строительного материала; однако конструкции с 3D-печатью, состоящие только из металлических материалов, довольно тяжелые. Цементирующие материалы являются наиболее часто используемыми [14-15, 18, 23].

Для печати используется стандартный пескобетон, доступный на любом строительном рынке, обладающий классом прочности М300 (плотность $\rho=2000 \text{ кг/м}^3$). При расчете стоимости и других параметров мы принимаем во внимание использование обычного бетона без различных добавок, которые могут изменить его свойства. Это означает, что мы используем стандартную бетонную смесь, состоящую из цемента, песка и воды без добавления каких-либо модификаторов или усилителей. Такой подход позволяет нам оценить базовые затраты и характеристики материала, что облегчает анализ и планирование проекта 3D-печати.

Перед началом работ сухую смесь смешивают с водой для получения готового раствора. Оптимальный состав пропорции пескобетона М300: 1 кг смеси к 170 мл жидкости, т.е. на 10 кг – 1,7 л. Для объема в 1 м^3 необходимо 1700 кг сухой смеси. Рассчитаем необходимое количество пескобетона М300, исходя из расхода материала по формуле (2).

$$\frac{0,1298 \text{ м}^3 \cdot 1700 \text{ кг}}{1 \text{ м}^3} = 221 \text{ кг} \quad (2)$$

Средняя закупочная стоимость пескоцемента на декабрь 2024 г. - 244 руб. за 25 кг сухой смеси [28].

Таким образом, стоимость смеси определяется по формуле (3):

$$\frac{221 \text{ кг} \cdot 244 \text{ руб}}{25 \text{ кг}} = 2157 \text{ руб} \quad (3)$$

Расходы на материалы могут зависеть от ряда факторов, таких как энергоэффективность оборудования, трудозатраты на смешивание и заливку бетона. Для нашего примера оценим их в 10% от стоимости бетонной смеси. Тогда стоимость вычисляется по формуле (4):

$$2157 \text{ руб} + 10\% = 2373 \text{ руб} \quad (4)$$

Аренда 3D-принтера:

Строительный 3D-принтер «АМТ» S-6044 для печати МАФ предоставляется университетом. Все последующие технические характеристики оборудования взяты из технического паспорта 3D-принтера.

Расходы на электроэнергию:

Для расчета расхода электроэнергии при печати на 3D-принтере используется формула (5):

$$Q = P \cdot t \quad (5)$$

где Q – энергозатраты принтера, кВтч;

P – мощность принтера, $P = 2,5 \text{ кВт}$;

t – время печати, ч.

Время печати рассчитывается исходя из производительности принтера. Производительность (Π) 3D-принтера – $0,6 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Время печати скамейки t определяем по формуле 6:

$$t = \frac{V}{\Pi}, \quad (6)$$
$$t = \frac{0.1298}{0.6} = 0.22 \text{ ч}$$

Кроме того, следует учитывать время для подготовки и настройки принтера к печати. Обычно это время варьируется от 30 минут до 1 часа. Для нашего расчёта возьмём среднее значение – 45 минут. Тогда общее время печати составит $0,22+0,75=0,97$ ч.

Расход электроэнергии в киловатт-часах (кВтч), который требуется для печати скамейки:

$$Q = 2.5 \cdot 0.97 = 2.425 \text{ кВтч}$$

При расчете стоимости электроэнергии в городе Санкт-Петербурге мы учитываем тарифы, установленные местными энергокомпаниями, а также потребление электроэнергии, которое определяется в киловатт-часах. Затраты на печать в денежном эквиваленте на декабрь 2024 г.:

$$6.19 \text{ руб} / \text{кВтч} \cdot 2,425 \text{ кВтч} = 15 \text{ руб.}$$

В расчет стоимости не включены дополнительные расходные материалы, такие как клеи, абразивные материалы и другие компоненты, необходимые для обработки или отделки печатных деталей. Эти материалы обычно используются для широкого спектра продукции и не привязаны к конкретному изделию, такому как скамейка. Поэтому их стоимость не учитывается при расчете затрат на печать одной скамейки.

Суммарная стоимость затрат на печать одной скамейки на 3D-принтере определяем по формуле 7:

$$\sum P = 2373 + 15 = 2388 \text{ руб.}, \quad (7)$$

В специализированных магазинах стоимость семейки варьируется в зависимости от бренда, размера, качества материалов и других факторов.

Так, например, скамейка, выполненная в виде бетонно-монолитной конструкции с фактурой натурального камня как на рис.4 имеет стоимость 20 900 руб. на декабрь 2024 г. Размеры скамейки соответствуют размерам скамейки, рассмотренной в статье.

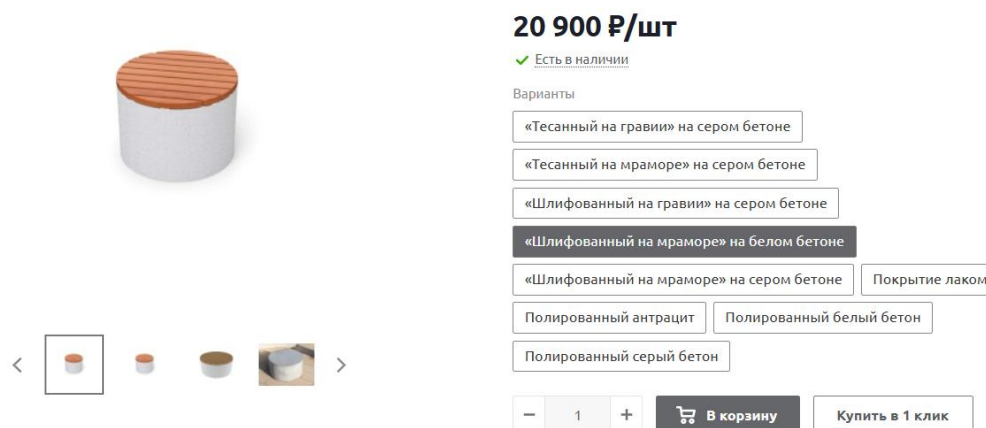


Рис. 4. Скамейка
Fig.4. The bench

Можно сделать вывод, что в случае наличия у университета бетонного 3D-принтера печать на нём малых архитектурных форм выходит дешевле в 33 раза, чем приобретение готовых изделий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье мы определили, что для благоустройства территории университета наиболее популярными малыми архитектурными формами являются павильоны, скульптуры, арки, скамейки, элементы освещения. Была рассчитана стоимость печати скамейки на бетонном 3D-принтере – 2388 руб. В специализированных магазинах стоимость скамеек около 21 000 руб. Таким образом, сравнительный анализ стоимости показывает, что использование 3D-печати для создания малых архитектурных форм может быть более экономически эффективным, учитывая сокращение трудозатрат и более эффективное использование материалов. Однако конкретные результаты могут варьироваться в зависимости от специфики проекта, доступных технологий и условий рынка. Ещё одним немаловажным преимуществом использования 3D-печати, является тот факт, что возможно быстро адаптировать печать под изготовление элементов близким к исторической стилистике зданий и сооружений, формирующих окружающее пространство, даже если они являются объектами культурного наследия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов Р.Т., Прокопьев А.П., Якшина А.А., Пиндур С.В. Моделирование 3D печати малых архитектурных форм // Вестник Евразийской науки. 2020. №2(12). С. 1-9.
2. Дорожук Н.Р. Малые архитектурные формы в городской среде // International scientific review. 2016. №21(31). С. 92-93.
3. Кулагина А.А., Барина Д.В. Роль малых архитектурных форм в благоустройстве города // НАУ. 2015. №7-3(12). С. 64-65.
4. Алиева Р.И., Соколова М.А. Материал в формировании облика малых архитектурных форм // АМІТ. 2023. №1(62). С. 327-346.
5. Самигуллина Р.Р. Роль информационных технологий в процессе проектирования малых архитектурных форм // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. №10(3).
6. Моторина Ю.В., Москвин Н.А. Формирование пространства университетских кампусов с целью создания благоприятных условий с учетом современных требований и развития в структуре города // Вестник РУДН. Серия: Агротомия и животноводство. 2013. №5. С. 76-84.
7. Валькова А.Н., Сорокина Т.С. Малые архитектурные формы. Их виды и значение в ландшафтном дизайне. Садовые фигуры из природных материалов // Евразийский научный журнал. 2018. №4. С. 111-113.
9. Проектирование малых архитектурных форм для 3D-печати // Наука и образование ON-LINУ.
10. Коротеев Д.Д., Коренева А.И. Применение аддитивных технологий производства в строительстве на примере разработки 3D-модели с последующей печатью // Системные технологии. 2021. №2 (39). С. 20-28.
11. Ли Лулу. строительные 3D-принтеры и их преимущества и недостатки // Экономика и социум. 2023. №10 (113)-1. С. 503-507.
12. Гетманченко О.В., Вяткина Б.М. Роль городского дизайна и малых архитектурных форм в развитии туристической индустрии // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2014. №5 (10). С. 103-112.
13. Мустафин Н.Ш., Барышников А.А. Новейшие технологии в строительстве. 3D-принтер // Региональное развитие. 2015. № 8 (12).
14. Лысыч М. Н. Материалы, доступные в рамках различных технологий 3D печати // М. Н. Лысыч, М. Л. Шабанов, Р. В. Воронцов // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 5. С. 20-25. EDN UHWEIN.
15. C.M. Rangel, A.S. Guimaraes, T.A.M. Salet, S.S. Lucas 3D printing lightweight mortars with cork to improve thermal efficiency in buildings // Construction and Building Materials. 2023. № 425. С. 1-19.
16. Rassokhin A.S., Ponomarev A.N., Shambina S.L., Karlina A.I. High performance lightweight concretes for 3D printing // Magazine of Civil Engineering. 2022. 115(7). Article № 11510.
17. Mukhametrakhimov, R.Kh., Lukmanova, L.V. Structure and properties of mortar printed on a 3D printer // Magazine of Civil Engineering. 2021. 102(2). Article № 10206.
18. Peng Wu, Jun Wang, Xiangyu Wang A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry // Automation in construction. 2016. № 68. С. 21-31.
19. Khan M., Sanchez F., Zhou H. 3-D printing of concrete: Beyond horizons // Cement and Concrete Research.
20. Khan M., Sanchez F., Zhou H. A critical review of 3D printing in construction: benefits, challenges, and risks // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2020. № 20.
21. Songyuan Geng, Qiling Luo, Kun Liu, Yunchao Li , Yuchen Hou, Wujian Long Research status and prospect of machine learning in construction 3D printing // Case Studies in Construction Materials . 2023. № 18.
22. Romdhane L. 3D Printing in Construction: Benefits and Challenges // International Journal of Structural and Civil Engineering Research . 2020. № 9. С. 314-317.
23. Gonçalo Duarte, Nathan Brown, Ali Memari, José Pinto Duarte Learning from historical structures under compression for concrete 3D printing construction // Journal of Building Engineering. 2021. № 43.
24. Rafael Robayo-Salazar, Ruby Mejía de Gutiérrez, Mónica A. Villaquirán-Cacedo, Silvio Delvasto Arjona 3D printing with cementitious materials: Challenges and opportunities for the construction sector // Automation in Construction. 2022. № 146.
25. Alireza Hasani, Sattar Dorafshan. Transforming construction? Evaluation of the state of structural 3D concrete printing in research and practice // Automation in Construction. 2024. Article № 137027.

ОБ АВТОРАХ

Софья Александровна Гриднева – студент специалитета Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: gridneva.sa@edu.spbstu.ru

Ксения Олеговна Боровкова – студент специалитета Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: borovkova.ko@edu.spbstu.ru

Ольга Сергеевна Царёва – доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: tsareva_os@spbstu.ru

ABOUT THE AUTHORS

Sofia A. Gridneva - specialist student of Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: gridneva.sa@edu.spbstu.ru.

Ksenia O. Borovkova - specialist student of Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: borovkova.ko@edu.spbstu.ru.

Olga S. Tsareva – Associate Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: tsareva_os@spbstu.ru.

УДК 69.04

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ КРИВОЛИНЕЙНЫХ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АРОК, СЖАТЫХ СИЛАМИ С ОДИНАКОВЫМИ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТАМИ

Г.М. Маркосян¹, Д.В. Уразгильдеев²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)

² АО «Механобр Инжиниринг», г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)

Аннотация. В данной статье произведен расчет стержневых элементов арок по деформационной теории прямолинейного стержня, с целью определения возможности применения данной теории к решению задач устойчивости стержней с криволинейной осью по изгибно-крутильной форме, где кривизна элементов учитывается, как начальное несовершенство. Для решения поставленной задачи используется алгоритм «Стержень». Для сопоставления результатов расчета по каждой из теорий, выводятся коэффициенты устойчивости в зависимости от радиуса кривизны, гибкости и относительного эксцентриситета (увеличивающего или уменьшающего кривизну арки). Также для наглядности некоторые результаты представлены в графическом виде.

Ключевые слова: стержень с криволинейной осью, деформационная теория прямолинейных стержней, тонкостенный стержень открытого профиля, устойчивость по изгибно-крутильной форме.

Ссылка для цитирования: Маркосян Г.М., Уразгильдеев Д.В. Оценка устойчивости тонкостенных криволинейных стержневых элементов арок, сжатых силами с одинаковыми эксцентриситетами // Инженерные исследования. 2024. №5(20). С. 22-30. EDN: QKLOZI

ASSESSMENT OF THE STABILITY OF THIN-WALLED CURVED BAR ELEMENTS OF ARCHES COMPRESSED BY FORCES WITH THE IDENTICAL ECCENTRICITIES

G.M. Markosyan¹, D.V. Urazgildeev²

¹ Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

² JSC "Mekhanobr Engineering", St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. In this article, the core elements of arches are calculated according to the deformation theory of a rectilinear bar, in order to determine the possibility of applying this theory to solving problems of stability of bars with a curved axis in a flexural-torsional shape, where the curvature of the elements is taken, into account as an initial imperfection. The "Pivot" algorithm is used to solve this problem. To compare the calculation results for each of the theories, stability coefficients are derived depending on the radius of curvature, flexibility and relative eccentricity (increasing or decreasing the curvature of the arch). Also, for clarity, some of the results are presented graphically.

Keywords: a bar with a curved axis, the deformation theory of rectilinear rods, a thin-walled Bar with an open profile, stability in a flexural-torsional shape.

For citation: Markosyan G.M., Urazgildeev D.V. Assessment of the stability of thin-walled curved bar elements of arches compressed by forces with the identical eccentricities // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2024. No.5(20). Pp. 22-30. EDN: QKLOZI

ВВЕДЕНИЕ

Для оценки устойчивости по изгибно-крутильной форме стержневых элементов арок необходимо, в соответствии с деформационной теорией криволинейных тонкостенных стержней [1], решить систему дифференциальных уравнений равновесия. В работе [3] был реализован данный расчет при упругой работе материала для криволинейного стержня, нагруженного продольной силой с равными концевыми двухосными эксцентриситетами, в следствии был получен коэффициент устойчивости, позволяющий определить критическую силу. Однако, при необходимости учета различных концевых моментов, приложенных к стержню, использование теории криволинейных стержней не представляется возможным из-за громоздкости уравнений.

Таким образом, настоящая статья посвящена исследованию устойчивости по изгибно-крутильной форме криволинейных элементов арок при упругой работе материала по теории прямолинейных стержней. Результаты, полученные по теории прямолинейного стержня, будем сравнивать с результатами работы [3].

Для изучения напряженно-деформированного состояния от начала загрузки до потери несущей способности используются дифференциальные уравнения изгиба и кручения по деформированному состоянию. В связи с тем, что сечение арки обладает большой изгибной жесткостью в главной плоскости ($I_x \gg I_y$), то перемещение в этой плоскости будет мало влиять на усилия, определяемые по изгибно-крутильным деформациям, следовательно, данным перемещением можно пренебречь.

В работе [3] рассматривается арка с равномерно-распределенной нагрузкой по площади покрытия, где от наихудшей комбинации РСУ были получены максимальные «недеформационные» усилия, которые будем обозначать «0» – N^0, M_x^0 . Потеря устойчивости арки из ее плоскости будет происходить на участке, который раскреплен прогонами, вырежем данный сегмент для дальнейшего исследования (рис.1). Рассмотрим данный участок, как шарнирно закрепленный в двух плоскостях, у которого углы закручивания концевых сечений отсутствуют (вилочные опоры), а депланация торцов стеснена упругими диафрагмами (рис.2). Для упрощения расчетной схемы введем силу F , и выразим ее через «недеформационные» усилия N^0 и M_x^0 . В следствии, сила F будет приложена к арке с равными концевыми двухосными эксцентриситетами (рис.2). $e_y = \frac{M_x^0}{N^0}$ – эксцентриситет в плоскости наибольшей жесткости арки; $e_{x,c} = \frac{l e_f y}{750} + \frac{i_y}{20}$ – случайный эксцентриситет из плоскости арки [10]; l – шаг прогонов; R – радиус кривизны арки; f – стрела подъема арки;

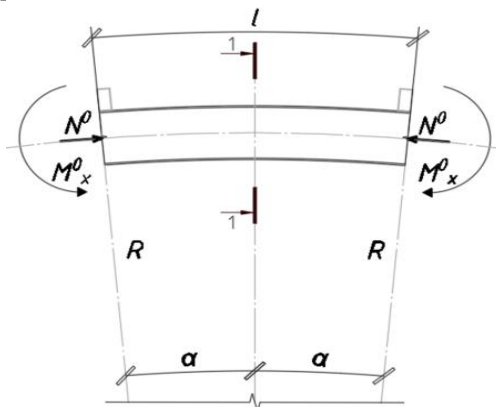


Рис. 1. Вырезанный сегмент арки между прогонами
 Fig. 1. A cut-out segment of the arch between the purlins

Система общих дифференциальных уравнений равновесия [2], с учетом симметричности сечения относительно главных осей и приложенных нагрузок, в соответствии с деформационной теорией прямолинейных стержней:

$$\begin{cases} EI_y u^{II} - N^0 u + M_x^0 \theta = 0 \\ EI_\omega \theta^{III} - GI_k \theta^I + M_x^0 u^I + i_p^2 N^0 \theta^I = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где:

I_y, I_ω, I_k – главный осевой момент инерции, секториальный момент инерции и момент инерции чистого кручения; E, G – модули линейной и угловой деформаций; $i_p = \sqrt{i_x^2 + i_y^2}$ – полярный радиус

инерции; u – перемещение сечения стержня вдоль оси X ; θ – угол закручивания сечения вокруг оси Z ; M_x^0 – изгибающий момент в плоскости наибольшей жесткости арки вокруг оси X ; Знак «штрих» показывает дифференцирование по длине стержня.

В расчете приняты следующие правила знаков:

1. Продольная сила отрицательна, если она сжимает элемент.
2. Изгибающий момент отрицательный, если его вектор-момент направлен против оси координат.
3. Перемещение положительно, если оно сонаправлено с осью системы координат.
4. Угол закручивания положительный, если, смотря по направлению положительной оси OZ сечение поворачивается по часовой стрелке.

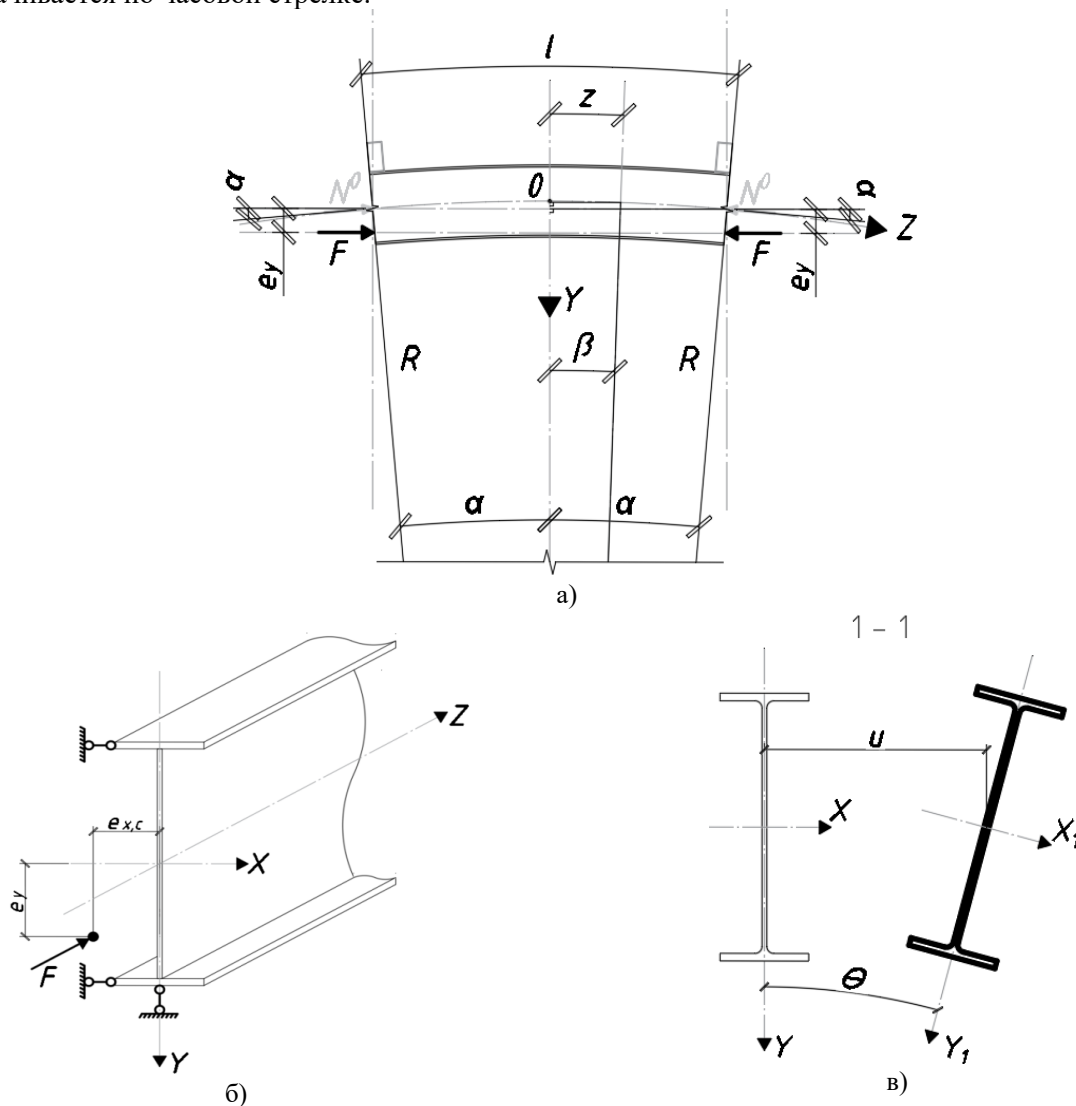


Рис. 2. Расчетная схема: а) – схема загрузки стержня; б) – граничные условия; в) – изгибно-крутильные перемещения сечения;

Fig. 2. Calculation scheme: a) – bar loading scheme; b) – boundary conditions; c) – flexural-torsional displacement of the section;

Начальную кривизну стержня будем учитывать, как начальное несовершенство. Учтем действительное распределение усилий по длине криволинейного стержня, для этого в системе (1) усилия, обозначенные «ноликом», представим в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 N^0 &= F \cos \beta; M_x^0 = F(R \cos \beta - R \cos \alpha + e_y); M_y^0 = F e_{x,c} \cdot \cos \beta; \\
 M_z^0 &= F e_{x,c} \cdot \sin \beta; \alpha = \frac{l}{2R}; \beta = \frac{z}{R};
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где:

M_y^0 – изгибающий момент из плоскости наибольшей жесткости арки вокруг оси Y; M_z^0 – изгибающий момент вокруг оси Z; z – координата по оси Z, изменяющаяся от 0 до $\frac{l}{2}$ включительно;

Для решения системы (1) воспользуемся аналитическим методом [2], в котором деформированное состояние двутавра опишем двумя "деформационными" уравнениями относительно перемещений и углов закручивания сечений:

$$u = u_n + u_{уст.}; \theta = \theta_n + \theta_{уст.} \quad (3)$$

где:

u_n, θ_n – функции перемещений и угла закручивания, полученные расчетом по недеформированной схеме; $u_{уст.}, \theta_{уст.}$ – функции потери устойчивости;

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ НЕДЕФОРМАЦИОННОГО РАСЧЕТА

Решаем уравнения, составленные по недеформированной расчетной схеме, для определения первых слагаемых (3) с индексом «н»:

$$u_n = U_n \psi_n(z); \theta_n = \Theta_n v_n(z); \quad (4)$$

где:

U_n, Θ_n – константы перемещения и угла закручивания (амплитуды изгибно-крутильных перемещений); $\psi_n(z), v_n(z)$ – безразмерные функции, определяющие формы деформирования;

Для того, чтобы определить перемещение и угол закручивания по недеформированной схеме, решим задачу недеформационного расчета:

$$EI_y u_n^{II} = Fe_{x,c} \cdot \cos\beta; EI_\omega \theta_n^{III} - GI_k \theta_n^I = Fe_{x,c} \cdot \sin\beta \quad (5)$$

Граничные условия:

1) при $z = 0$: $u_n^I = \theta_n^I = u_n^{III} = \theta_n^{III} = 0$; 2) при $z = \frac{l}{2}$: $u_n = \theta_n = u_n^{II} = \theta_n^{II} = 0$;

Для принятой расчетной схемы и граничных условий получим:

$$U_n = \frac{Fe_{x,c} R^2}{EI_y}; \Theta_n = \frac{Fe_{x,c} R^3}{EI_\omega}; \quad (6)$$

$$\psi_n(z) = \cos\alpha - \cos\left(\frac{z}{R}\right); \quad (7)$$

$$v_n(z) = \left[\frac{1}{(k^2 R^2 + 1)} \left(\cos\alpha - \cos\left(\frac{z}{R}\right) \right) + \frac{\sin\alpha (ch(kl) - ch(kz))}{k^2 R^2 (k^2 R^2 + 1) ch\left(\frac{kl}{2}\right)} - \frac{\cos\left(\frac{z}{R}\right)}{(k^2 R^2 + 1)} \right] \quad (8)$$

где:

$k = \sqrt{\frac{GI_k}{EI_\omega}}$ – изгибно-крутильная характеристика.

РЕШЕНИЕ БИФУРКАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ УСТОЙЧИВОСТИ

Решаем уравнения бифуркационной задачи устойчивости, определим вторые слагаемые (3) с индексом «уст»:

$$u_{уст.} = U_{уст.} \psi_{уст.}(z); \theta_{уст.} = \Theta_{уст.} v_{уст.}(z); \quad (9)$$

где:

$U_{уст.}, \Theta_{уст.}$ – некоторые неизвестные константы, с точности до которых решаются бифуркационные задачи устойчивости; $\psi_{уст.}(z) = v_{уст.}(z)$ – формы потери устойчивости [4];

$$\psi_{уст.}(z) = v_{уст.}(z) = \cos\left(\frac{\pi z}{l}\right); \quad (10)$$

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ УСТОЙЧИВОСТИ ПО ИЗГИБНО-КРУТИЛЬНОЙ ФОРМЕ

Подставим в систему (1) уравнение (3):

$$\begin{cases} N_u = EI_y u_{уст.}^{II} - N^0(u_n + u_{уст.}) + M_x^0(\theta_n + \theta_{уст.}) = 0 \\ N_\theta = EI_\omega \theta_{уст.}^{III} - GI_k \theta_{уст.}^I + M_x^0(u_n + u_{уст.})^I + i_p^2 N^0(\theta_n + \theta_{уст.})^I = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Систему (11) решим методом Бубнова-Галёркина:

$$\int_0^{\frac{l}{2}} N_u \psi_{уст.}(z) dz = 0; \int_0^{\frac{l}{2}} N_\theta u_{уст.}(z) dz = 0; \quad (12)$$

Решим систему уравнений относительно двух неизвестных $U_{уст.}, \Theta_{уст.}$, определив которые будем иметь все компоненты перемещений и углов:

$$u = U_H \psi_H(z) + U_{уст.} \psi_{уст.}(z); \quad \theta = \Theta_H u_H(z) + \Theta_{уст.} u_{уст.}(z) \quad (13)$$

Изгибно-крутильные «деформационные» усилия с учетом полученных перемещений и углов:

$$M_y = M_y^0 - N^0 u + M_x^0 \theta; \quad B_\omega = -EI_\omega \theta'' \quad (14)$$

Для оценки устойчивости арки при упругой работе материала запишем проверку прочности согласно СП 16.13330.2017 по деформированной схеме среднего сечения вырезанного элемента, учитывая (14):

$$\frac{N^0}{AR_y \gamma_c} + \frac{M_x^0}{W_x R_y \gamma_c} + \frac{M_y^0 - N^0 u + M_x^0 \theta}{W_y R_y \gamma_c} + \frac{B_\omega}{W_\omega R_y \gamma_c} \leq 1 \quad (15)$$

Преобразуем и выведем коэффициент устойчивости $\varphi_{c,y}^*$:

$$\frac{N^0}{AR_y \gamma_c} + \frac{N^0 e_y}{\rho_x AR_y \gamma_c} + \frac{N^0 e_{x,c}}{\rho_y AR_y \gamma_c} - \frac{N^0 u}{\rho_y AR_y \gamma_c} + \frac{N^0 e_y \theta}{\rho_y AR_y \gamma_c} + \frac{N^0 \omega_N}{\rho_\omega AR_y \gamma_c} \leq 1 \quad (16)$$

$$\varphi_{c,y}^* = \frac{1}{(1 + m_x + m_y - \frac{(u(0) - e_y \theta(0))}{\rho_y} + m_\omega)} = \frac{N^0}{AR_y \gamma_c} \quad (17)$$

где:

ρ_x, ρ_y – ядровые расстояния; ρ_ω – секториальная координата крайней точки профиля; $\omega_N = \frac{B_\omega(0)}{N^0}$ – «деформационная» секториальная координата точки приложения силы; $m_x = \frac{e_y}{\rho_x}, m_y = \frac{e_{x,c}}{\rho_y}, m_\omega = \frac{\omega_N}{\rho_\omega}$ – относительные осевые и «деформационный» секториальный эксцентриситеты; $W_\omega = \frac{I_\omega}{\rho_\omega}$ – секториальный момент сопротивления сечения;

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Построим две расчетные схемы в Лира-САПР с одинаковой высотой подъема, одинаковым шагом прогонов, но разными радиусами кривизны и рассмотрим выделенные фрагменты (рис.3). От наихудшей комбинации загружений получим максимальные усилия в элементе арки.

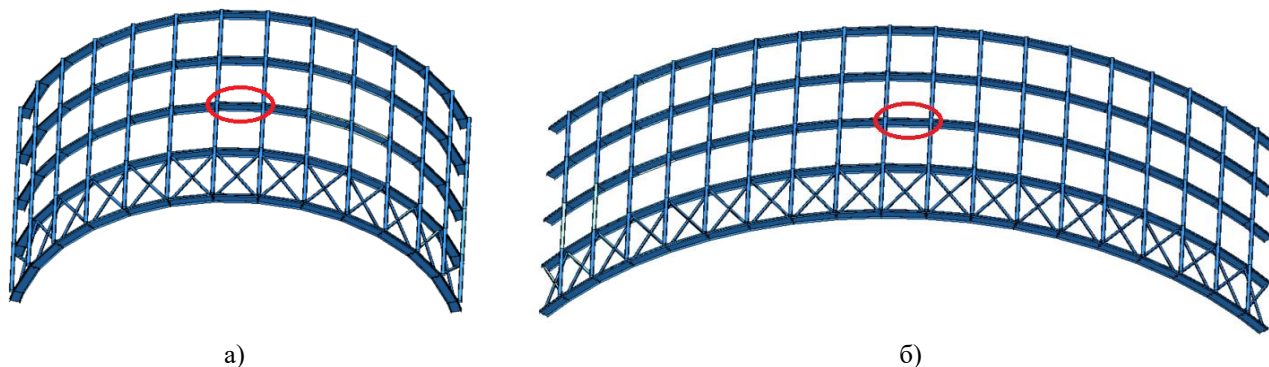


Рис. 3. Общий вид рассматриваемых конструкций: а) – каркас №1 ($R = 15m; f = 12m; l = 3m.$); б) – каркас №2 ($R = 30m; f = 12m; l = 3m.$);

Fig. 3. General view of the structures under consideration: а) – skeleton №1 ($R = 15m; f = 12m; l = 3m.$); б) – skeleton №2 ($R = 30m; f = 12m; l = 3m.$);

Задача устойчивости по изгибно-крутильной форме решим для стержней с условной гибкостью λ' от 1,6 до 5,2 при одной и той же длине криволинейного стержня. Гибкость стержня менялась за счет изменения сечения. Для исследования устойчивости были рассмотрены две схемы (рис.4) загрузки продольной силой F в плоскости арки. Значения относительных эксцентриситетов в плоскости наибольшей жесткости $m_x = \pm 1; \pm 3$.

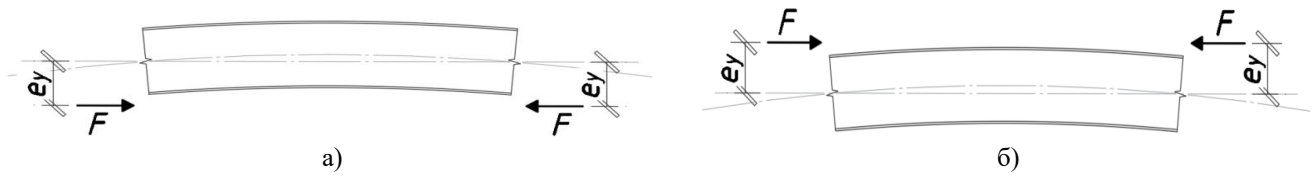


Рис. 4. Схемы загрузки продольной силой: а) – схема №1 – сила, увеличивающая кривизну стержня
 б) – схема №2 – сила, уменьшающая кривизну стержня
Fig. 4. Schemes of loading by lengthwise force: a) – sheme №1 – force increasing the curvature of the bar
 б) – sheme №2 – force reducing the curvature of the bar

Построим графики и нанесем значения, полученные по теории прямолинейного стержня (сплошные линии) и по теории криволинейного стержня [3] (пунктирные линии). Графики зависимости приведены для коэффициентов устойчивости и гибкости, с учетом относительного эксцентриситета $m_x = \pm 1$ и радиуса кривизны (рис.5, рис.6). В табл.1 представлено сопоставление результатов расчетов, полученных по двум теориям.

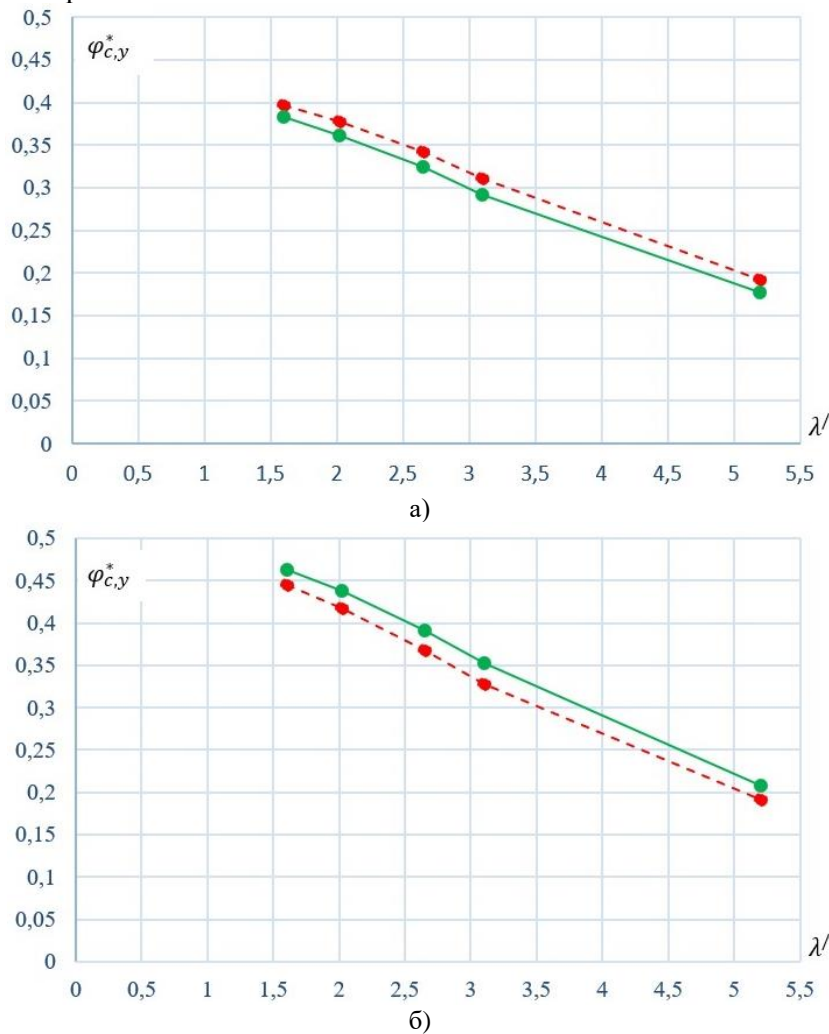


Рис. 5. Графики зависимости $\varphi_{c,y}^*$ от λ' по теории прямого (сплошная линия) и криволинейного стержней (пунктирная линия) для $R = 15m$: а) $m_x = +1$; б) $m_x = -1$;
Fig. 5. Dependence graphs according $\varphi_{c,y}^*$ and λ' to the theory of straight (green line) and curved bars (red dotted line) for $R = 15m$: а) $m_x = +1$; б) $m_x = -1$;

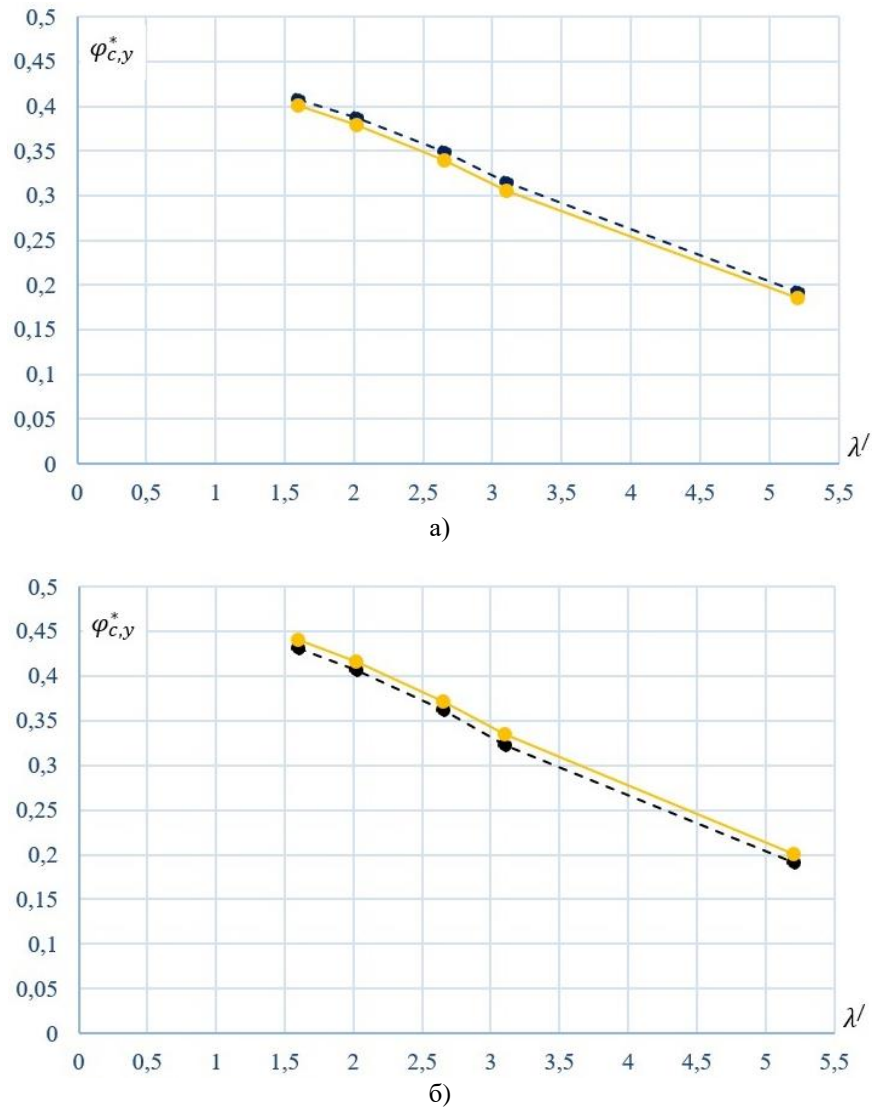


Рис. 6. Графики зависимости $\varphi_{c,y}^*$ от λ' по теории прямого (сплошная линия) и криволинейного стержней (пунктирная линия) для $R = 30\text{м}$: а) $m_x = +1$; б) $m_x = -1$;

Fig. 6. Dependence graphs according $\varphi_{c,y}^*$ and λ' to the theory of straight (green line) and curved bars (red dotted line) for $R = 30\text{m}$: а) $m_x = +1$; б) $m_x = -1$;

Таблица 1. Коэффициенты устойчивости $\varphi_{c,y}^*$, полученные по теории криволинейного и прямолинейного стержней
Table 1. Stability coefficients $\varphi_{c,y}^*$, obtained from the theory of curvilinear and rectilinear bars

m_x	λ'	Радиус кривизны				Сравнение методов, %	
		$R = 15\text{м}$		$R = 30\text{м}$		$R = 15\text{м}$	$R = 30\text{м}$
		По теории кривого стержня	По теории прямого стержня	По теории кривого стержня	По теории прямого стержня		
+1	1,6	0,3964	0,3826	0,407	0,4006	3,476	1,562
	2,02	0,3773	0,3614	0,3869	0,3784	4,213	2,192
	2,65	0,3423	0,3243	0,3487	0,3392	5,263	2,736
	3,1	0,3105	0,2915	0,3148	0,3052	6,143	3,030
	5,2	0,1929	0,177	0,1929	0,1855	8,242	3,846
-1	1,6	0,4452	0,4632	0,4314	0,4399	4,048	1,966
	2,02	0,4176	0,4377	0,407	0,4165	4,822	2,344
	2,65	0,3678	0,3911	0,3614	0,372	6,340	2,933
	3,1	0,3275	0,3519	0,3233	0,3349	7,443	3,607
	5,2	0,1918	0,2077	0,1918	0,2003	8,287	4,420

m_x	λ'	Радиус кривизны				Сравнение методов, %	
		$R = 15\text{м}$		$R = 30\text{м}$		$R = 15\text{м}$	$R = 30\text{м}$
		По теории кривого стержня	По теории прямого стержня	По теории кривого стержня	По теории прямого стержня		
+3	1,6	0,209	0,205	0,212	0,210	2,030	1,000
	2,02	0,200	0,195	0,202	0,200	2,646	1,047
	2,65	0,184	0,179	0,187	0,183	2,874	1,705
	3,1	0,171	0,164	0,172	0,169	3,727	1,852
	5,2	0,113	0,106	0,112	0,108	6,542	3,774
-3	1,6	0,220	0,226	0,217	0,220	2,404	1,366
	2,02	0,210	0,216	0,208	0,210	3,030	1,020
	2,65	0,191	0,198	0,189	0,193	3,889	2,247
	3,1	0,174	0,182	0,173	0,177	4,878	2,454
	5,2	0,109	0,117	0,110	0,113	6,796	2,885

По результатам в таблице 1 видно, что при положительном значении момента (увеличивающий кривизну) результаты по теории прямолинейного стержня дают заниженные значения критических параметров по сравнению с криволинейным стержнем, а в случае с отрицательным моментом картина обратная. Это факт можно объяснить тем, что начальная кривизна стержня оказывает стабилизирующий эффект на конструкцию и разгружает момент увеличивающий кривизну стержня, и наоборот – догружает момент уменьшающий кривизну стержня. Данный эффект не учтен в теории прямолинейного стержня.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основании полученных результатов по сопоставлению результатов расчета по теории прямолинейного и криволинейного стержней можно сделать следующие выводы: расчет стержневых элементов арок на устойчивость по изгибно-крутильной форме допускается производить, основываясь на теории прямого стержня. На основе алгоритма "Стержень" предложен алгоритм расчета на устойчивость по изгибно-крутильной форме стержневых элементов сплошностенчатых арок бисимметричного сечения при упругой работе материала. Изучена особенность деформирования и потери устойчивости криволинейных стержней при различных случаях загрузки. По результатам показано, что с увеличением кривизны знак момента значительно влияет на устойчивость при относительно малых эксцентриситетах. Разница между двумя теориями, при заданной кривизне стержня 15м и относительном эксцентриситете $m_x = +1$, составляет не более 9%. При этом, при малых радиусах необходимо вводить дополнительный поправочный коэффициент, зависящий от кривизны и знака момента, который учитывал бы особенности деформирования стержней с криволинейной осью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бейлин Е.А., Белый Г.И. Деформационный расчет и пространственные формы потери устойчивости тонкостенных криволинейных стержней // Сопротивление материалов и теория сооружений. Киев: Будивельник. 1972. Вып. 16. С. 186-189.
2. Бейлин Е.А. Общие уравнения деформационного расчёта и устойчивости тонкостенных стержней // Строительная механика и расчёт сооружений. 1969. №5. С.35-41.
3. Белый Г.И., Уразильдеев Д.В. К расчету на устойчивость криволинейных стержневых элементов сплошностенчатых стальных арок по изгибно-крутильной форме // Вестник гражданских инженеров. 2018. №2(67). С. 54-59. DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-2-54-59. EDN USSMTC.
4. Белый Г.И. О расчете упругих стержней по деформированной схеме при действии активных и параметрических нагрузок // Механика стержневых систем и сплошных сред. Л., 1980. С. 41-48.
5. Уразильдеев Д. В. Экспериментальное исследование изгибно-крутильных деформаций и устойчивости криволинейных элементов стальных арок двутаврового сечения // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 1(78). С. 94-99. DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-1-94-99. EDN SVDLYY.
6. Советников Д.О., Азаров А.А., Иванов С.С., Рыбаков В.А. Методы расчета тонкостенных стержней: статика, динамика, устойчивость // AlfaBuild. 2018. №3(1). С. 7-33.
7. Дмитриев А.Н., Семенов А.А., Лалин В.В. Устойчивость равновесия упругих арок с учетом искривления оси // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 4(67). С. 19-31. DOI 10.18720/CUBS.67.2. EDN ХТҮНХҒ.

8. Серазутдинов М. Н. Аналитические решения для криволинейных стержней на основе соотношений для прямолинейного стержня // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № 2(64). С. 70-79. DOI 10.52409/20731523_2023_2_70. EDN YWXCUL.
9. Колоколов С. Б. Методика подбора сечения стальной арки при помощи деформационного расчета // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 5(180). С. 151-154. EDN VAUOUJ.
10. Кудишин Ю.И., Беленя Е.И., Игнатъева В.С. Металлические конструкции: учебник для студ. высш. учеб. заведений; под общ. ред. Ю.И. Кудишина. – М.: Академия, 2010. 681 с.

ОБ АВТОРАХ

Григорий Маратович Маркосян – магистрант Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: markosyan.grisha999@mail.ru

Дмитрий Вадимович Уразгильдеев – консультант, руководитель архитектурно-строительного отдела. АО «Механобр Инжиниринг». 199106, Россия, г. Санкт-Петербург, В.О., 22 линия д.3 к.7. E-mail: urazgildeev.dv@mekhanobr.com

ABOUT THE AUTHORS

Grigoriy M. Markosyan – master's student of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU) 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: markosyan.grisha999@mail.ru

Dmitriy V. Urazgildeev – consultant, head of the architectural and construction department. JSC “Mekhanobr Engineering”. 199106, Russia, St.Petersburg, V.O., Line 22, bldg. 3-7K, office 204. E-mail: urazgildeev.dv@mekhanobr.com

УДК 691

КОНСТРУКТИВНЫЕ СВОЙСТВА УСТОЙЧИВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ АЗИИ

С. Туннвортн, Д.А. Шарапов

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

Аннотация. Строительная отрасль в Юго-Восточной Азии стремительно растет, способствуя ухудшению состояния окружающей среды из-за высокого потребления энергии и выбросов CO₂. Цель этой статьи — изучить, как устойчивые материалы, такие как переработанная сталь, бамбук и экологически чистый бетон, могут играть свою роль в строительстве, и какие преимущества и недостатки это может иметь. Эти материалы частично изучались другими исследователями на предмет конструктивных свойств, экологических преимуществ и экономичности. Однако, несмотря на проблемы, включая более высокие первоначальные затраты и доступность материалов, это исследование привлечет внимание к тому факту, что устойчивые материалы могут сделать: это не только снижение воздействия строительного сектора на окружающую среду, но и повышение долгосрочной энергоэффективности. Эта статья сыграет значительную роль в использовании этих материалов в реальной практике. Продвижение устойчивых методов строительства может смягчить воздействие на окружающую среду, одновременно поддерживая городское развитие в Юго-Восточной Азии. Результаты этого исследования позволят получить представление об устойчивых материалах. Также статья привлечет больше внимания со стороны экспертов и исследователей для проведения дальнейших исследований по этой теме.

Ключевые слова: устойчивые материалы, Юго-Восточная Азия, переработанная сталь, бамбук, экологически чистый бетон, летучая зола, воздействие на окружающую среду

Ссылка для цитирования: Туннвортн С., Шарапов Д.А. Конструктивные свойства устойчивых материалов для строительства в Юго-Восточной Азии // Инженерные исследования. 2024. №5(20). С. 31-41. EDN: RIKKBT

CONSTRUCTIVE PROPERTIES OF SUSTAINABLE BUILDING MATERIALS IN CONSTRUCTION FOR SOUTHEAST ASIA

S. Thunnvortn, D.A. Sharapov

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

Abstract. The construction industry in Southeast Asia is growing rapidly, contributing to environmental degradation due to high energy use and CO₂ emissions. The aim of this article, is to explore how sustainable materials like recycled steel, bamboo, and eco-friendly concrete could play their roles in the construction and what benefits and drawbacks would it appeared to be. These materials were studied partially by other researchers for the structural performances, environmental advantages, and economic. However, despite challenges, including higher initial costs and material availability, this study will draw the attention to the fact that sustainable materials can do: it is not just to reduce the environmental impact of the construction sector but also promote long term energy efficiency. This paper would play significant role for the usage of these materials in the real practice. Promoting sustainable building practices can mitigate the environmental impact while supporting urban development in Southeast Asia. The results of this research, will bring the insights over the sustainable materials, as well as, this paper would bring more attention from experts and researchers to conduct further research on this topic.

Keywords: sustainable materials, Southeast Asia, recycled steel, bamboo, eco-friendly concrete, fly ash, environmental impact

For citation: Thunnvortn S., Sharapov D.A. Constructive properties of sustainable building materials in construction for Southeast Asia // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2024. No.5(20). Pp. 31-41. EDN: RIKKBT

ВВЕДЕНИЕ

Southeast Asia, with its rapidly growing urban population and economic development, is experiencing a construction uprise, for instance, Singapore, Thailand, Vietnam, Cambodia, ...etc. However, this growth comes at the cost of environmental degradation, as the construction industry is one of the largest sources of carbon emissions and resource consumption in the region. According to recent studies, the sector accounts for approximately 39% of the world's energy use and produces 25-40% of global carbon emissions [1]. The carbon footprints of sustainable materials (62.25 kg CO₂ eq per square meter) are substantially lower than those of traditional materials (171.93 kg CO₂ eq per square meter) [2]. Southeast Asia is a region which well known for their cultural building which were built by woods and bamboos, etc.



Рис. 1. Бамбуковый мост в Green School, Бали¹
Fig. 1. A bamboo bridge at Green School, Bali



Рис. 2. Проект гостиницы в Сиануквиле, Камбоджа²
Fig. 2. A hotel project in Sihanoukville, Cambodia

Sustainable materials, such as bamboo, recycled steel, and eco-friendly concrete, are now being promoted as environmentally friendly alternatives which could provide the region's growing demand for infrastructure while reducing its carbon foot print [3, 4]. Consistent certification systems, integrated building operation management, ongoing technological advancements, and appropriate policy adjustments are all necessary criteria for sustainable construction [2]. The increasing demand for sustainable construction practices, driven both environmental and economic concerns, has led to a search for alternative building materials that reduce the carbon footprint, and enhance energy efficiency (Fig.3).

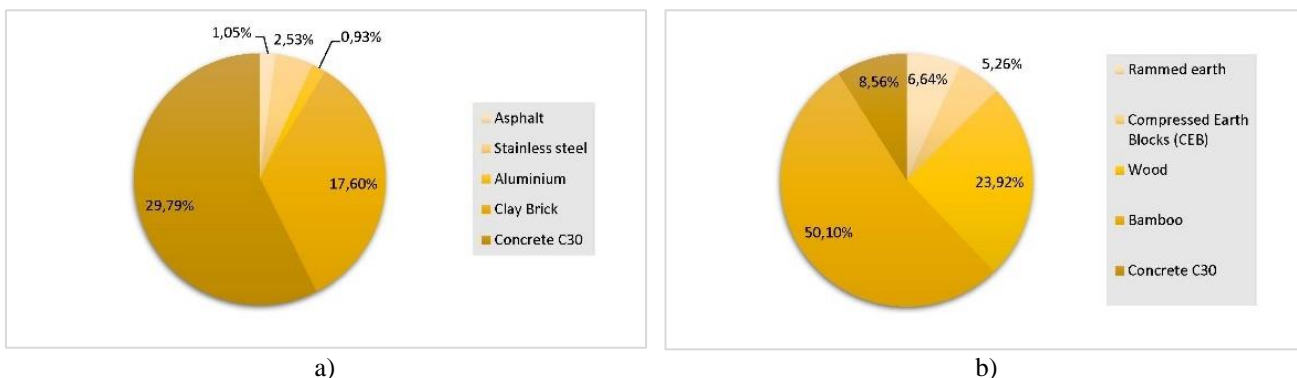


Рис. 3. Вклад % кг CO₂-экв. на материал: а – традиционные материалы; б – устойчивые материалы [2]
Fig. 3. Contribution % of kg CO₂ eq. per material: a – traditional materials; b – sustainable materials

Bamboo, which is abundant in the region offers a sustainable solution due to its rapid growth and strength in tropical climates. Studies have shown that bamboo can replace traditional material in low- to mid-rise buildings, offering comparable strength while dramatically reducing environmental costs [5]. The development and application of green building materials has called for the promotion of sustainable construction in recent years, and bamboo is generally regarded as a characteristic form of green material [6]. The term "vegetal steel" refers to this alternative and renewable building material because of its great strength and low weight [7]. Bamboo

¹ The Jakarta Post [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.thejakartapost.com/travel/2018/07/22/seven-modern-buildings-to-visit-in-southeast-asia.html> (дата обращения: 15.11.2024)

² VTN Architects [Электронный ресурс]. – URL: <https://vtnarchitects.net/cambodia-hotel-pe261.html> (дата обращения: 17.11.2024)

fibers develop along the culms' longitudinal axis, which makes sense that bamboo's axial strength is significantly greater in the fiber direction than it is in the lateral direction [8]. Another advantage of bamboo as a material is its ability to resist dynamic impacts, such as earthquakes, since it does not undergo destruction through brittle cracking, as in concrete [9-10]. With a high moisture content, bamboo's mechanical qualities: tension, compression, and shear, while its behavior at failure becomes more ductile [11]. It has socioeconomic advantages, as it is affordable and long-lasting [12]. Bamboo can be utilized in organically curved constructions and can prove to be a good substitute for current building materials [13]. The essential mechanical characteristics of bamboo are summarized and shown in (Table. 1) [14-19].

Таблица 1. Механические свойства бамбука [14-19]
Table 1. Ranged of mechanical properties of bamboo

№	Mechanical property	Range
1	Tensile strength (MPa)	70-210
2	Compressive strength (MPa)	20-65
3	Elastic modulus (MPa)	2500-17500

Short waste reinforcing bar (rebar) is produced when new reinforcing bar is cut and bent, during the construction of buildings and other infrastructure. 3-5% of the original rebar may be wasted as a result of such operations, and in certain cases, up to 10% [20]. Commercial structures typically utilize 0.119 tons of rebar per m³ of concrete, whereas residential buildings typically use about 0.077 tons [21]. Steel production is energy-intensive, but recycling steel significantly reduces its environmental impact by minimizing the need for virgin raw materials and reducing energy consumption by up to 75% [22]. One notable approach that adheres to sustainable construction norms is the use of recycled steel fibers that are taken from used tires using techniques like shredding, pyrolysis, or cryogenics. By reusing waste materials, this creative access reduces environmental impact and conserves important resources, which is in line with the principles of sustainable construction. This strategy has a lot of promise; it is projected that the European Union alone could harvest half a billion tons of steel fibers from worn tires each year [23]. When used as reinforcement in hybrid designs that incorporate steel rebar and fibers, recycled steel fibers have shown promising results [24]. Waste rebar could be remanufactured into steel by-product for items like nails (Fig.4). By preventing rebar waste and reducing the need to manufacture new steel nails, these nails can be conducting in the building industry to support a circular economy, which will lower construction costs and environmental impacts [25-27]. Recycled steel provides the same structural properties as new steel while significantly reducing energy consumption [28].

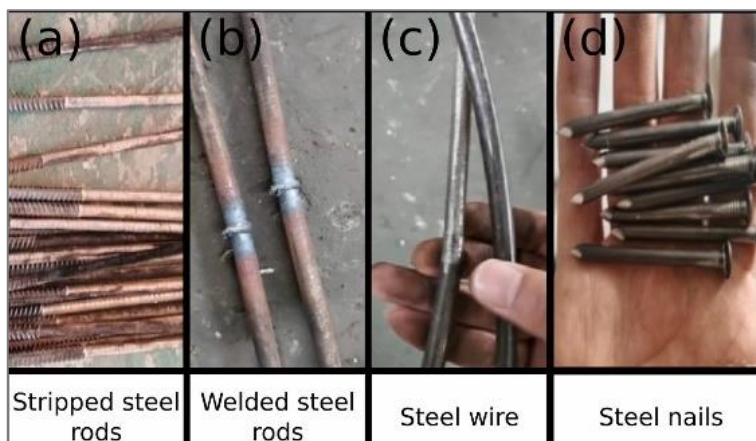


Рис. 4. Фотографии отходов арматуры после различных этапов процесса восстановления: а – зачищенные стальные стержни после зачистки ребер; б – сваренные стальные стержни после сварки встык; в – стальная проволока после уменьшения диаметра; г – конечный продукт в виде стального гвоздя [20]

Fig. 4. Photographs of the waste rebar after various steps in the remanufacturing process: a – stripped steel rods after stripping of the ribs; b – welded steel rods after butt welding; c – steel wire after diameter reduction; d – final steel nail product

One of the most widely used materials is concrete, which is consumed worldwide second only to water. It is seen as a crucial element in the modern construction sector. Due to its high energy requirements and emissions

of greenhouse gases, primarily carbon dioxide (CO₂). Portland cement, which is a key ingredient in the manufacturing of concrete, presents a risk to the environment [29-32]. Regards to earlier studies, 4 GJ of energy are used and about 0.9 tons of CO₂ are released into the environment during the manufacturing of one ton of Portland cement [33-35]. Furthermore, the cement-making process releases a number of hazardous gases, including as SO₂, NOX, CO, and dust, which seriously pollutes the environment [36-37]. Joseph Davidovits developed geopolymers in the 1970s as a sustainable substitute for regular concrete made of Portland cement and emits roughly one-sixth of the CO₂ generated by traditional cement [38-40]. Materials rich in aluminosilicates, including fly ash, slag, metakaolin, and rice husk ash activated by an alkaline solution, are used to create geopolymers [29, 41]. Regards to [41], the specimen of fly ash compressive test is shown in (Fig.5). In addition to its advantageous mechanical qualities and other important characteristics, such as its superior resistance to chemical attack, thermal stability, and reduced greenhouse gas emissions, it is a sustainable substitute for conventional cement-based concrete. However, geopolymer concrete frequently has high brittleness and low ductility, which presents problems in structural applications where toughness and ductility are extremely important [42-44].

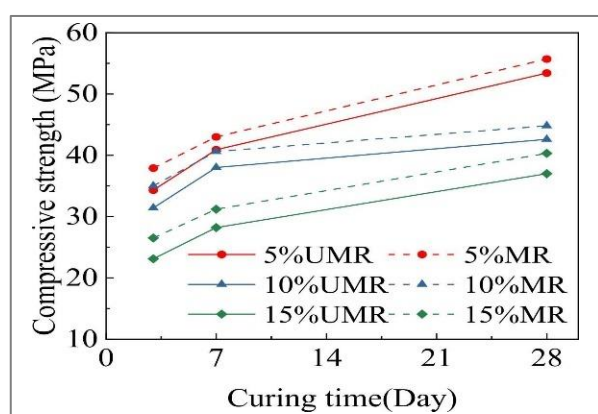


Рис. 5. Образец летучей золы (Span-40) с измененными результатами прочности на сжатие [41]
Fig. 5. The Specimen of fly ash (Span-40) modified compressive strength results

This article explores the use of sustainable materials such as bamboo, recycled steel and eco-friendly concrete in Southeast Asia, by examining the environmental and economic feasibility of these materials, as well as, the study will contribute to the growing body of research and support the transition to greener construction practices, focusing on their potential benefits and challenges within the regional context.

To accomplish the aim, the following tasks have been set:

- to adopt the benefit of its usage using Lifecycle Assessment (LCA)
- to analyze the cost benefit of using recycled steel, bamboo and fly ash concrete for Southeast Asia

THE STUDY MATERIALS

There are three sustainable building materials which are chosen for this study: bamboo, recycled steel and eco-friendly concrete (fly ash); which is playing a crucial material in the Asia regions like China, Indonesia, Cambodia, Vietnam, and Thailand. The bamboo used in the study, are chosen from the literature review and were harvested in Southeast Asia regions, while the recycled steels was sourced from the demolition projections across the region, however those steels, will be put under well treatment from the factory, as the result, the products will be returning with the strength and durability as new steels. Particularly, not just the quality of the recycled steels may as good as the new steels to 100%, even though, the tensile reduce up to 10-20% of its original capacity, but still, this material is the best for considering of its usage for the sustainability materials [45]. For the eco-friendly concrete was prepared using flying ash as a partial replacement for Portland cement. In this case, the flying ash concrete, is referred to the concrete that made from the fly ash cement which were produced from the recycling of the municipal waste [46]. Additionally, concrete produced using supplementary cementitious materials like fly ash, were produced especially considering of reducing the carbon footprint of traditional concrete [47-48].

METHODOLOGY

For methodology of this study, Life Cycle Assessment (LCA) and Cost-Benefit Analysis (CBA), are used for analyzing and making assumption and consideration for the chosen materials. Life cycle assessment, will help this study for holding the insights of the environmental impacts throughout their entire lifecycle. The entire lifecycle of materials, means that it will be put under study from the start of its usage to demolition stage. Otherwise, cost-benefit analysis, is assisting to account on the cost of the sustainable materials, comparing to the traditional materials, which would possibly be replaced by the chosen materials for this study. Moreover, the cost in this research will be studied in the initial period and during its lifecycle period of usages.

The research methodology for this paper, is shown as illustrate in (Fig.6).

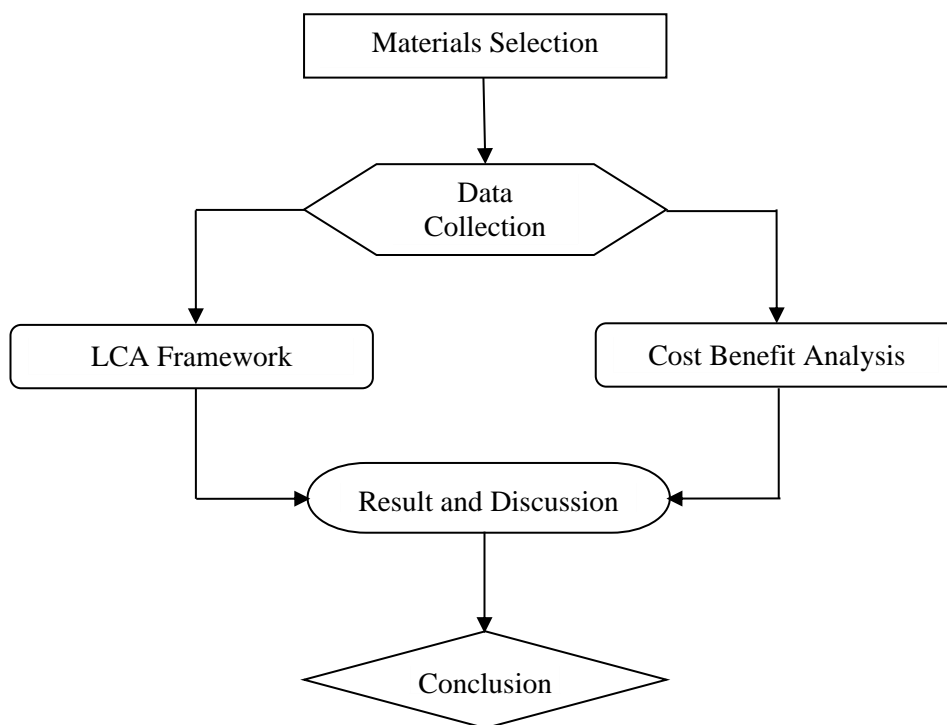


Рис. 6. Схема методики исследования
Fig. 6. Scheme of the research methodology

For the overall environmental impact of each material, is evaluated in accordance to the ISO 14040 standard for LCA, which are calculated using (1). In the particular, the main objective of this calculation is to evaluate the environmental performance of recycled steel, bamboo and eco-friendly concrete. The parameters used in Life Cycle Assessment (LCA) for each sustainable material present in (Table. 2).

$$I = \sum_{i=1}^n (E_i \cdot CF_i), \tag{1}$$

where:

I - the total impact.

E_i - the energy input or emissions in the lifecycle phase i .

CF_i - the characterization factor (CO₂ equivalent per unit of energy or material).

Таблица 2. Входные параметры LCA для каждого материала [49-52]

Table 2. LCA input parameters for each material

№	Parameter	Recycled Steel	Bamboo	Eco-Friendly Concrete
1	Energy Consumption (MJ)	10.70	5.40	8.90
2	Carbon Emissions (kg CO ₂)	2.50	1.10	1.80
3	Water Usage (m ³)	1.20	0.80	0.90
4	Resource Depletion (kg)	0.02	0.03	0.05
5	Lifespan (years)	50	30	40

To analyze and evaluate the economic feasibility of these sustainable materials, a Cost-Benefit Analysis (CBA) is performed. The CBA compares the lifecycle costs of recycled steels, bamboo and eco-friendly concrete with traditional materials like new steels and Portland cement-based concrete. The cost structure includes; initial costs, maintenance costs, and end-of-life costs. The CBA also plays as a role for the factor in the potential for carbon credits, which can be sold based on the CO₂, savings achieved by using sustainable materials

The Cost-Benefit Analysis of each material is calculated by using the formula (2):

$$NPV = \sum_{t=0}^n \left(\frac{B_t - C_t}{(1-r)^t} \right), \quad (2)$$

where:

NPV- the net present value of using the material.

B_t - the benefit of energy saving and reduced CO₂ emissions in year t.

C_t - the cost of materials and maintenance in year t.

r - the discount rate.

t - the time period or building lifecycle.

RESULTS

The findings from this study demonstrate that the integration of sustainable building materials; recycled steel, bamboo and eco-friendly concrete; provides significant environmental, economic, and technical benefits when applied in the construction industry, particularly in Southeast Asia. The Life Cycle Assessment (LCA) results reveal that these materials offer substantial reductions in CO₂ emissions compared to their traditional counterparts. Recycled steel shows a 40% decrease in emissions compared to the new steels, while bamboo and eco-friendly concrete also demonstrate a remarkable reduction in carbon footprint. The result has shown that with bamboo, the carbon emission is almost neutral compares to another materials (Fig.7).

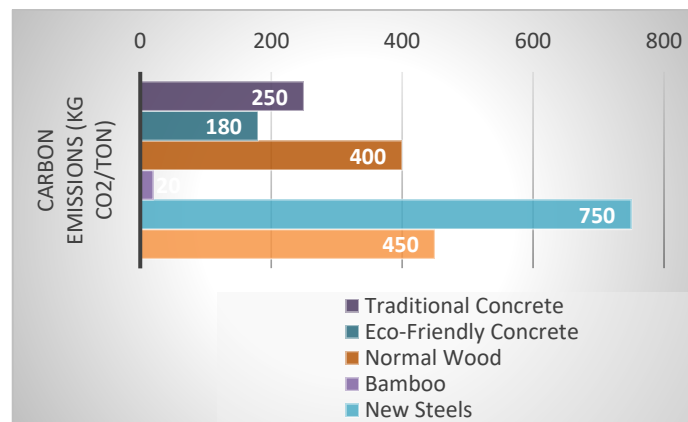


Рис. 7. Выбросы углерода для устойчивых и традиционных материалов
Fig. 7. Carbon Emissions for Sustainable & Traditional Materials

Within the result of the cost-benefit analysis, demonstrate that despite higher initial costs, the lifecycle cost of the sustainable materials chosen for this study, is noticeably lower. Recycled steel, bamboo, and eco-friendly concrete reduce lifecycle costs by 15-20%, 10-12% and 20% respectively, as a result of reduced energy consumption and lower maintenance needs. The sensitivity analysis further reinforces the long-term economic viability of these materials, even when accounting for variations in discount rates. Energy efficiency is a critical advantage of using bamboo and eco-friendly concrete, as both materials show substantial improvements in thermal performance, leading to significant reductions in energy consumption for climate control. Over 50 years building lifecycle, bamboo and eco-friendly concrete reduce energy use by 30% and 20%, respectively, compared to traditional materials. Furthermore, the material strength analysis demonstrates that recycled steel offers superior tensile strength, 20% higher than traditional steel, while eco-friendly concrete provides similar compressive strength to traditional concrete but with enhanced crack resistance. Bamboo's tensile strength is comparable to normal wood, making it a suitable alternative for certain structural applications.

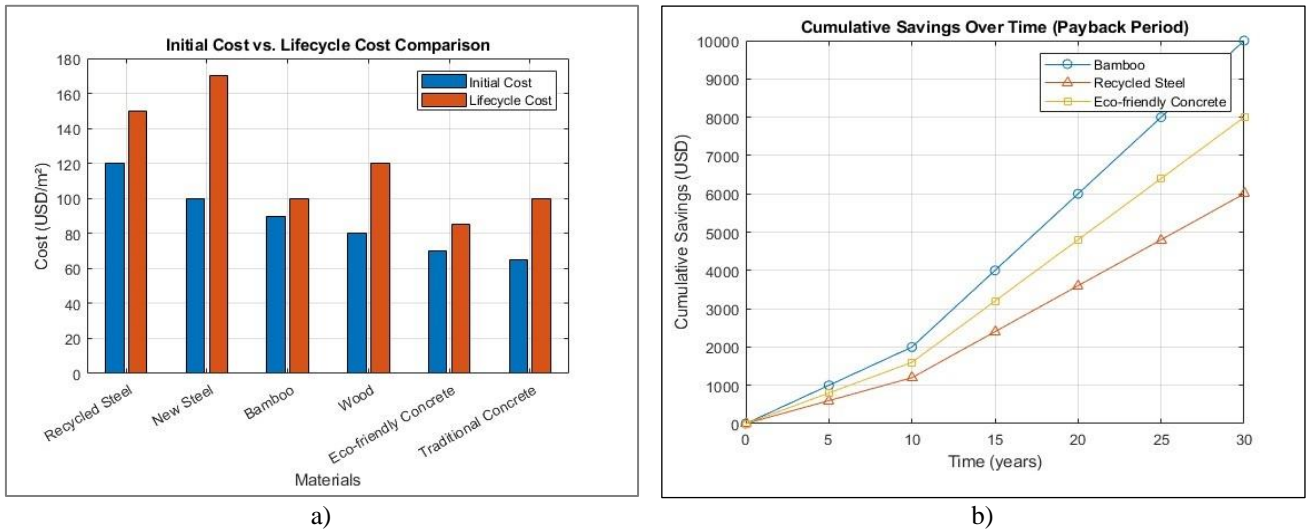


Рис. 8. Анализ затрат и выгод (CBA): а – начальная стоимость сравнивается со стоимостью жизненного цикла; б – накопленная экономия с течением времени
Fig. 8. The Cost-Benefit Analysis (CBA): a – Initial cost compares to Lifecycle Cost; b – Cumulative Saving Over Time

The results confirm that adopting sustainable building materials in construction projects can effectively address environmental concerns, improve energy efficiency, and reduce long-term costs without compromising structural performance. These findings strongly support the use of recycled steel, bamboo, and eco-friendly concrete as viable alternatives to traditional construction materials in Southeast Asia’s growing construction sector. As shown in (Fig.9), with the period of 50 years, recycled steel tends to work with a well performance with a 15% reduction in strength only, while bamboo shows a much decline in durability, with up to 60% in 20 years and possibly up 100% in 50 years period. This is largely due to susceptibility to moisture, pests and biodegradation. But for the short term use up to 10 years, bamboo is well known for its good tensile strength and affordable price, which is best for temporary structures. However, the eco-friendly concrete performs in an opposite way of the both materials above, which means that it can resist well to exposing in the environment, including moisture and chemical reaction, and would decrease its durability to 20% only.

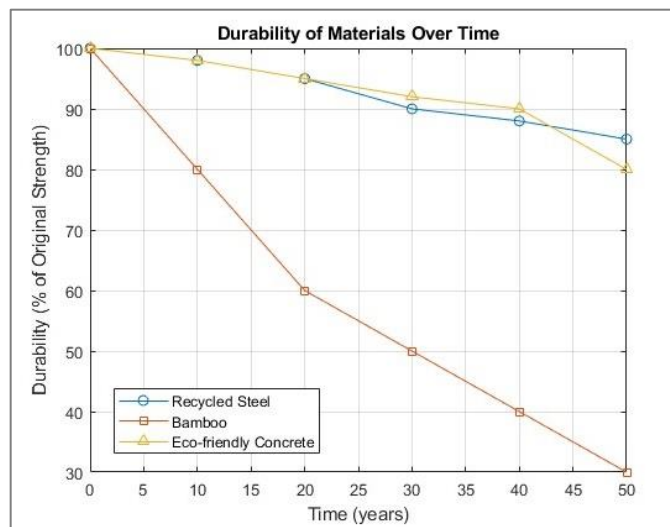


Рис. 9. Долговечность материалов с течением времени
Fig. 9. The Durability of Materials Over Time

DISCUSSION AND RECCOMENDATION

Recycled steel offers substantial environmental benefits by reducing energy consumption during production, and its widespread adoption can significantly lower the carbon footprint of construction in urban projects. Moreover, it maintains high structural integrity, making it suitable for both residential and commercial applications. Bamboo stands out as an ideal material for low-rise structures, especially in rural areas, due to its abundance and low carbon footprint. However, its use in urban settings and functions is limited due to durability

concerns in humid climates and the need for advanced treatment processes. Fly ash concrete provides a sustainable alternative to conventional concrete, reducing the carbon footprint associated with cement production. Its increased durability and moisture resistance make it well-suited for tropical climates, as seen in Malaysia, Cambodia and Vietnam. However, its adoption faces challenges due to inconsistent availability of fly ash and regulatory hurdles in some Southeast Asia country, for instance, Cambodia and Thailand. The findings from the results also confirm that sustainable building materials can significantly reduce the environmental impact of the construction industry in Southeast Asia. The materials, which were chosen for this article play its role significantly to offer substantial CO₂ reductions, though the exact benefits vary depending on the material's source and application. Following the above results, the selected materials; recycled steel, bamboo, and eco-friendly concrete (fly ash concrete) reveals distinct trends in performance over time. Hence, the assumption is showed and arrange into a table for easy to understand and will be convenient for researchers and experts to put under consideration for their further studies over the topic about these materials to serve in the sustainability subject (Table. 3).

Таблица 3. Экономическая эффективность и долговечность устойчивых материалов
Table 3. Cost Efficiency and Durability of Sustainable Materials

№	Material	Early Cost	Long-term Cost Saving	Durability
1	Recycled Steel	Moderate	High	High
2	Bamboo	Low	Moderate	Requires treatment
3	Eco-Friendly Concrete (Fly Ash)	Moderate	High	High

CONCLUSION

1. Southeast Asia is the region that could start the further step of reducing the environmental footprint of the construction industry. According to the results obtained above, we could state that some materials: recycled steels, bamboo, and eco-friendly concrete could be used as sustainable materials to replace some traditional materials. These materials are not just reducing the carbon footprint, at the same time offer numerous environment and economic benefits as well, including enhanced energy efficiency and long-term savings.

2. Challenges such as higher initial costs, material availability, and the region's climate must be addressed. Government, industries and researchers must collaborate for the further studies and to promote the development of infrastructure and policies that facilitate the adoption of sustainable materials, ensuring that Southeast Asia's construction industry contributes to a more sustainable future. Recycled steel, bamboo, and fly ash concretes are promising alternatives to traditional materials, offering significant environmental and cost benefits.

3. Bamboo is well-suited for rural, low-structure due to its negative carbon footprint and availability, while recycled steel is ideal for urban projects, reducing energy consumption and waste. Fly ash concrete offers improved durability and reduced emissions, particularly in tropical climates. Overall, sustainable building materials can play a vital role in reducing the environmental impact of construction while supporting the region's growth.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Natalia F.A., Muhammad Sh. Reducing embodied carbon emissions of buildings – a key consideration to meet the net zero target// *Journal of Sustainable Futures*, Vol. 7, June 2024. P. 94–102. DOI: 10.1016/j.sfr.2024.100166
2. Zhang, Yinqi & Wang, He & Gao, Weijun & Wang, Fan & Zhou, Nan & Kammen, Daniel & Ying, Xiaoyu. A Survey of the Status and Challenges of Green Building Development in Various Countries// *Sustainability*, September 2019. DOI: 10.3390/su11195385
3. Fei Lai, Jinzhi Zh., Lin Lu, M. Hasanuzzaman, Yanqing Y. Green building technologies in Southeast Asia// *Journal of Sustainable Technologies and Assessments*, Vol. 55, February 2023. P. 71–78. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102946
4. Nguyen T., Vo L. Bamboo as a sustainable building material for Southeast Asia // *Eco-Construction Trends Conference*, Ho Chi Minh City, 12–14 November 2019. Ho Chi Minh: Ho Chi Minh University Press, 2019. P. 41–48.
5. Shen, Liyin & Yang, Junsu & Zhang, Rong & Shao, Changzhan & Song, Xiangnan. The Benefits and Barriers for Promoting Bamboo as a Green Building Material in China—An Integrative Analysis//*Sustainability* 2019, Vol.11, No. 3, April 2019. DOI: 10.3390/su11092493
6. Tagamud Tazmeen, Fasil Qayoom Mir. Sustainability through materials: A review of green options in construction//*Results in Surfaces and Interfaces*, Vol. 14, February 2024. DOI: 10.1016/j.rsufi.2024.100206
7. Fahim M., Haris M., Wajid Khan, Saeed Zaman. Sustainable bamboo housing for the earthquake prone areas//*IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, November 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/955/1/012019

8. Fahim M., Haris M., Wajid Khan, Saeed Zaman. Bamboo as a Construction Material: Prospects and Challenges//Advances in Science and Technology Research Journal, Vol. 16, No. 3, June 2022. P. 41–48. DOI: 10.12913/22998624/149737
9. Kritsuk, L. A. Dynamic calculation of seismic load in PLAXIS 2D / L. A. Kritsuk, D. A. Sharapov // ISI Science Week: Proceedings of the All-Russian Conference in 3 parts, St. Petersburg, April 26–30, 2021 / Institute of Civil Engineering of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Volume Part 1. – St. Petersburg: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University", 2021. – P. 125–127.
10. Sharapov D.A., Gebre T.H., Ali Yu.M. The effect of story drift in a multi-story building under the influence of an earthquake // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2021. Vol. 17, No. 3. P. 270-277. DOI: 10.22363/1815-5235-2021-17-3-270-277.
11. Qingfeng Xu, Kent Harries, Xiangmin Li, Qiong Liu, Jennifer Gottron. Mechanical properties of structural bamboo following immersion in water//Engineering Structures Journal, Vol. 81, December 2014. P. 230–239. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.09.044.
12. Manandhar R., Kim J.H., Kim J.T. Environmental, social and economic sustainability of bamboo and bamboo-based construction materials in buildings//Journal of Asian Architecture and Building Engineering, Vol.18, No. 2, 2019. P.49-59 DOI: 10.1080/13467581.2019.1595629
13. Nischal P.N. Pradhan, Themelina S. Paraskeva, Elias G. Dimitrakopoulos. Quasi-static reversed cyclic testing of multi-culm bamboo members with steel connectors//Journal of Building Engineering, Vol.27, January 2020. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.100983
14. S. Amada, Sun U. Fracture properties of bamboo // Composite Part B: Engineering, Vol.32, Issue 5, 2001. P. 451-459. DOI: 10.1016/S1359-8368(01)00022-1
15. Ghavami K. Bamboo: Low cost and energy saving construction materials//Modern bamboo structures: CRC Press, ICBS-January 2008. P. 5-21.
16. Huang F., Guo W. Structural and mechanical properties of the spines from Echinocactus grissini cactus//Journal of Materials Science, Vol.48, No.16, August 2013. DOI: 10.1007/s10853-013-7335-4
17. Li H., Shen S. The mechanical properties of bamboo and vascular bundles // Journal of Materials Research, Vol.26, No.21, November 2011. DOI: 10.1557/jmr.2011.314
18. K. Murali Mohan Rao, K. Mohana Rao. Extraction and tensile properties of natural fibers: Vakka, date and bamboo//Journal of Composite Structures, Vol.77, No.3, February 2007. DOI: 10.1016/j.compstruct.2005.07.023
19. T. Tan, N. Rahbar, S.M. Allameh, S. Kwofie, D. Dissmore, K. Ghavami, W.O. Soboyejo. Mechanical properties of functionally graded hierarchical bamboo structures//Journal of Acta Biomaterialia, Vol.7, No.10, October 2011. P.3796-3803 DOI: 10.1016/j.actbio.2011.06.008
20. Ziyad Tariq Abdullah. A sustainable recycling approach for construction: A case of remanufacturing waste rebar into steel nails// Results in Engineering, Vol.23, September 2024. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102777
21. Kwon K., Kim D., Kim S. Cutting Waste Minimization of Rebar for Sustainable Structural Work: A Systematic Literature Review//Journal of Sustainability, Vol.13, No.11, 2021. DOI: 10.3390/su13115929
22. Mohan Y., Gavin M. Mudd, P.G. Ranjith, A. Tharumarajah. Environmental life-cycle comparisons of steel production and recycling: sustainability issues, problems and prospects//Journal of Environmental Science & Policy, Vol.14, No.6, October 2011. P. 650-663 DOI: 10.1016/j.envsci.2011.04.008
23. Javier Pereiro-Barceló, Eduardo Lenz, Benjamín Torres, Luis Estevan. Mechanical properties of recycled aggregate concrete reinforced with conventional and recycled steel fibers and exposed to high temperatures//Journal of Construction and Building Materials, Vol.252, November 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138976
24. Esmail Gholami, Hassan Afshin, Mohammad C. Basim, Mohammad S. Ultra-high performance recycled steel fiber reinforced concrete segments under the thrust force of TBM jacks and their environmental potentialities//Journal of Structures, Vol.47, January 2023. P. 2465-2484. DOI: 10.1016/j.jstruc.2022.12.051
25. Z.T. Abdullah. Remanufacturing end-of-life passenger car waste sheet steel into mesh sheet: A sustainability assessment//PLoS One, Vol.16, No.10, October 2021. DOI: 10.1371/journal.pone.0258399
26. Kim, S.-K., Hong, W.-K. and Joo, J.-K. Algorithms for Reducing the Waste Rate of Reinforcement Bars//Journal of Asian Architecture and Building Engineering, Vol.3, No.1, 2004. P. 17-23. DOI: 10.3130/jaabe.3.17
27. Z. T. Abdullah. Economic Feasibility Assessment of Reclaiming Waste Sheet Steel from End-of-Life Vehicles//IEEE Engineering Management Review, Vol.50, No.2, June 2022. P. 110-116. DOI: 10.1109/EMR.2022.3143436
28. Bassam A. Burgan, Michael R. Sansom. Sustainable steel construction//Journal of Constructional Steel Research, Vol.62, No.11, November 2006. P. 1178-1183. DOI: 10.1016/j.jcsr.2006.06.029
29. Y. Park, Ali Abolmaali, Young Hoon Kim, Masoud G. Compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete with crumb rubber partially replacing sand//Journal of Construction and Building Materials, Vol.118, August 2016. P. 43-51. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.001
30. Weiguo Shen, Yi Liu, Bilan Yan, Jing Wang, Pengtao He, Congcong Zhou, Xujia Huo, Wuzong Zhang, Gelong Xu, Qingjun Ding. Cement industry of China: Driving force, environment impact and sustainable development//Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.75, 2017. P. 618-628. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.033

31. Natt Makul. Modern sustainable cement and concrete composites //Journal of Sustainable Materials and Technologies, Vol.25, September 2020. DOI: 10.1016/j.susmat.2020.e00155
32. Peter Duxson, John L. Provis, Grant C. Lukey, Jannie S.J. van Deventer. The role of inorganic polymer technology in the development of Green Concrete//Journal of Cement and Concrete Research, Vol.37, No.12, December 2007. P. 1590-1597. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.08.018
33. Sabbie A. Miller, Vanderley M. John, Sergio A. Pacca, Arpad Horvath. Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050//Journal of Cement and Concrete Research, Vol.114, December 2018. P. 115-124. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.08.026
34. Zhuo Tang, Wengui Li, Yong Hu, John L. Zhou, Vivian W.Y. Tam. Review on designs and properties of multifunctional alkali-activated materials (AAMs)//Construction and Building Materials, Vol.200, March 2019. P. 474-489. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.157
35. Yong Hu, Zhuo Tang, Wengui Li, Yunan Li, Vivian W.Y. Tam. Physical-mechanical properties of fly ash/GGBFS geopolymer composites with recycled aggregates//Construction and Building Materials, Vol.226, November 2019. P. 139-151. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.211
36. Y.H. Mugahed Amran, Rayed Alyousef, Hisham Alabduljabbar, Mohamed El-Zeadani. Clean production and properties of geopolymer concrete//Journal of Cleaner Production, Vol.251, April 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119679
37. Francis N. Okoye, Satya Prakash, Nakshatra B. Singh. Durability of fly ash based geopolymer concrete in the presence of silica fume//Journal of Cleaner Production, Vol.149, April 2017. P. 1062-1067. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.02.176
38. Georgy Lazorenko, Anton Kasprzhitskii, Alexander Kruglikov, Vasilii Mischinenko, Victor Yavna. Sustainable geopolymer composites reinforced with flax tows//Ceramics International, Vol.46, No.8, Part B, June 2020. P. 12870-12875. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.01.184
39. Ahmed M. Tahwia, Ashraf M. Heniegal, Mohamed Abdellatif, Bassam A. Tayeh, Mohamed Abd Elrahman. Properties of ultra-high performance geopolymer concrete incorporating recycled waste glass//Case Studies in Construction Materials, Vol.17, December 2022. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01393
40. Khizar Nazir, Orhan Canpolat, Mucteba Uysal. Durability properties of steel, polyamide, and polyethylene fiber-reinforced geopolymer mortar made with recycled concrete aggregate and glass powder as fillers//Journal of Building Engineering, Vol.76, October 2023. DOI: 10.1016/j.job.2023.107313
41. Xiaodong Wang, Chuanxi Cheng, Dongye Wang. Effect of rice husk ash on mechanical properties of rubber doped geopolymer recycled concrete//Case Studies in Construction Materials, Vol.20, July 2024. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03406
42. Rui Ren, Li Li. Impact of polyethylene fiber reinforcing index on the flexural toughness of geopolymer mortar//Journal of Building Engineering, Vol.57, October 2022. DOI: 10.1016/j.job.2022.104943
43. Sarath C.K., Purna S. Contribution of Fly ash to the properties of Mortar and Concrete // International Journal of Earth Sciences and Engineering, Vol. 04, October 2011.
44. Reagan J.C., Kai D., Thuraichamy G.S. On Effects of Fly Ash as a Partial Replacement of Cement on Concrete Strength // Journal of Applied Mechanics and Materials, Vol.204-208, 2012. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.204-208.3970
45. Gul A., Alam B., Shahzada K., Ahmed W., Junaid I., Javed H., Khan E., Impact of length and percentage dosage of recycled steel fibers on the mechanical properties of concrete //Journal of Civil Engineering, Vol.7, October 2021. P. 1650-1666. DOI: 10.28991/cej-2021-03091750
46. Agrawal D., Waghe U., Ansari K., Amran M., Gamil Y., Allugmani A., Thakare N., Optimization of eco-friendly concrete with recycled coarse aggregates and rubber particles as sustainable industrial byproducts for construction practices //Journal of Heliyon, Vol.10, 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e25923
47. Tosti L., Andre Z., Jan R., Rob N.J., Technical and environmental performance of lower carbon footprint cement mortars containing biomass fly ash as a secondary cementitious material //Journal of Resources, Conservation and Recycling, Vol.134, July 2018. P. 25-33. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.03.004
48. Jingjing W., Yuanfeng W., Yiwen S., Danielle D.T., Yurong Z., Life cycle sustainability assessment of fly ash concrete structures//Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.80, 2017. P. 1162-1174. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.232
49. Amato P., Bucci G., Ferraiolo G. Recycled Steel and Sustainability in Construction // Proceedings of the International Conference on Green Building, Milan, 20–22 June 2019. Milan: Politecnico di Milano, 2019. P. 58–66.
50. Taylor P.J., Brown A. Analysis of Eco-Friendly Concrete in Construction Using Fly Ash // Materials Science for Sustainable Development, Tokyo, 18–20 September 2022. Tokyo: JST, 2022. P. 101–115.
51. G.K.C. Ding. Life cycle assessment (LCA) of sustainable building materials// Eco-efficient Construction and Building Materials, Woodhead Publishing, 2014. P. 38–62. DOI: 10.1533/9780857097729.1.38
52. Mudiyono R., Haidar A., Fredy A. Analysis of Environmentally Friendly Concrete (Green Concrete) Using Coal Fly Ash as a Substitute Material for Portland Cement in Road Pavement//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2024. DOI: 10.1088/1755-1315/1321/1/012043

ОБ АВТОРАХ

Сарик Тхуннвортн – магистрант Инженерно-строительного института. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: thunnvortns357@gmail.com

Дмитрий Андреевич Шарапов – доцент Инженерно-строительного института. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: sharapov.dm@gmail.com

ABOUT THE AUTHORS

Sarik Thunnvortn – Master’s degree student of the Institute of Civil Engineering. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU) 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: thunnvortns357@gmail.com

Dmitry A. Sharapov – Associate Professor at Institute of Civil Engineering. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU) 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: sharapov.dm@gmail.com

УДК 624.05

ТРАНСФОРМАЦИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ ПОСРЕДСТВОМ 3D-ПЕЧАТИ

Е.Э. Саркисова

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

Аннотация. На современном этапе развития технологий и средств информатизации строительная отрасль претерпевает изменения, касающиеся инновационных подходов и решений в своей деятельности. В рамках проблематики исследования, связанной с повышением эффективности строительной отрасли, необходимым условием является использование инструментов цифровизации. В качестве такого инструмента выступает 3D-печать. Как известно, строительство объектов, независимо от их вида и значения, является долгим процессом,отягощенным различными факторами и обстоятельствами. Высокие затраты на возведение объектов, воздействие на окружающую среду – все это обуславливает пересмотр традиционных подходов к строительству. В этом контексте 3D-печать рассматривается как инновационное решение с большим спектром возможностей для оптимизации процессов. В исследовании проведен сравнительный анализ параметров строительства с использованием технологии 3D-печати и традиционных методов. Установлено, что 3D-печать позволяет снизить затраты на материалы и время возведения объектов, а также уменьшить экологический след. Рассмотрены основные способы применения технологии, включая создание строительных блоков и возведение зданий высотой до пяти этажей. В работе выделены существующие ограничения, такие как высокая стоимость оборудования и узкий выбор строительных материалов, и предложены пути их преодоления. Результаты исследования подтверждают эффективность 3D-печати как альтернативного метода строительства, способного оптимизировать процессы, снизить затраты и ускорить сроки реализации проектов.

Ключевые слова: 3D-строительство, 3D-печать, быстрое прототипирование, 3D-принтер, строительные 3D-принтеры, аддитивное производство, инновационные технологии.

Ссылка для цитирования: Саркисова Е.Э. Трансформация строительной отрасли посредством 3D-печати // Инженерные исследования. 2024. №5(20). С. 42-50. EDN: AZFHCU

TRANSFORMATION OF THE CONSTRUCTION INDUSTRY THROUGH 3D PRINTING

E.E. Sarkisova

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. At the present stage of development of technologies and means of informatization, the construction industry is undergoing changes regarding innovative approaches and solutions in its activities. Within the framework of the research issues related to improving the efficiency of the construction industry, the use of digitalization tools is a prerequisite. 3D printing acts as such a tool. As you know, the construction of facilities, regardless of their type and significance, is a long process, burdened by various factors and circumstances. High costs for the construction of facilities, environmental impact – all this leads to a revision of traditional approaches to construction. In this context, 3D printing is seen as an innovative solution with a wide range of possibilities for process optimization. The study conducted a comparative analysis of the construction parameters using 3D printing technology and traditional methods. It has been established that 3D printing can reduce the cost of materials and the time of construction of facilities, as well as reduce the environmental footprint. The main ways of applying the technology are considered, including the creation of building blocks and the construction of buildings up to five floors high. The paper highlights the existing limitations, such as the high cost of equipment and a narrow choice of building materials, and suggests ways to overcome them. The results of the study confirm the effectiveness of 3D printing as an alternative construction method capable of optimizing processes, reducing costs and speeding up project deadlines.

Keywords: 3D construction, 3D printing, rapid prototyping, 3D printer, construction 3D printers, additive manufacturing, innovative technologies.

For citation: Sarkisova E.E. Transformation of the construction industry through 3D printing // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2024. No.5(20). Pp. 42-50. EDN: AZFHCU

ВВЕДЕНИЕ

Проблема исследования связана с тем, что трансформация строительной отрасли нуждается в серьезных подходах и методах работы. Но несмотря на преимущества 3D-печати, все же есть ряд сложностей, мешающих использовать эту технологию наиболее эффективным образом.

Научная новизна исследования состоит в том, что уточнены и рассмотрены новые возможности 3D-печати в рамках происходящих трансформационных процессов, изучены проблемы строительной отрасли на текущем этапе и предложены пути решения. В работе проведен сравнительный анализ основных параметров и критериев в строительстве на основе использования 3D-печати и традиционных методов, что позволяет сделать вывод об эффективности инновационных решений.

Результаты работы могут быть использованы специалистами для принятия решений в области строительства различных зданий, домов, конструкций.

Цель исследования состоит в том, чтобы изучить особенности трансформации строительной отрасли посредством 3D-печати и сравнить ее эффективность с традиционным способом.

Определив цель, стоит выделить такие задачи, как изучение специфики 3D-печати, ее возможностей в строительстве, ее влияние на эффективные решения в изучаемой сфере.

В экономике страны строительная отрасль является одной из лидирующих сфер деятельности по значимости и по объему вклада в развитие. Сейчас сфера строительства высоких зданий и объектов находится на этапе серьезной трансформации с точки зрения обновления технологий и подходов. Одновременно с этим разработка новаторских решений в данной сфере, особенно при возведении частных домов, практически стоит на месте, не показывая значительного прогресса на протяжении последних нескольких лет. Несмотря на то, что развиваются технологии и происходят изменения в смежных отраслях, на участках, где продолжают возводиться дома, все еще отсутствует четкая механизация процесса и преобладает ручной труд [1]. Стоит сказать, что пандемийный 2020 год также негативно сказался на сфере строительства, вызвав неожиданный скачок цен на важнейшие строительные материалы, включая металл, цемент и дерево.

Так как сейчас происходит динамичная трансформация в строительной сфере, то в рамках цифровизация в последние годы и в настоящее время началась стадия активного развития данного сектора. Эта трансформация затрагивает не только технологии, но и культуру, методы работы в строительной отрасли [2]. Она охватывает такие области, как проектирование, строительство, эксплуатация и управление зданиями и сооружениями [3].

Поэтому в условиях текущих вызовов технология 3D-печати стала примером адаптивного современного метода в строительстве, подразумевая при этом возведение объектов за счет наложения материала слой за слоем. Получаемые именно таким образом модели объектов можно использовать на различных этапах строительства, начиная с разработки прототипов для дальнейшего тестирования и заканчивая выпуском конечных продуктов [4].

Стоит сказать, что сейчас в строительстве применяется преимущественно три способа 3D-печати. Одним из методов является способ селективного спекания. Он подразумевает применение 3D-принтеров, которые с помощью лазера или солнечной энергии способны расплавить рабочий материал, такой как обычный песок [1].

Согласно оценке и прогнозу экспертов использование 3D -печати имеет активную тенденцию к росту. Об этом свидетельствуют следующие данные: в 2020 году рынок насчитывал продажи порядка 3.8 миллионов устройств, а по прогнозу на 2025 год данная отметка достигнет показателя в 26 миллионов единиц. Такой показатель отражает широкое распространение и интеграцию технологии 3D-печати в различные области деятельности, подтверждая ее нарастающую популярность и востребованность (рис.1).

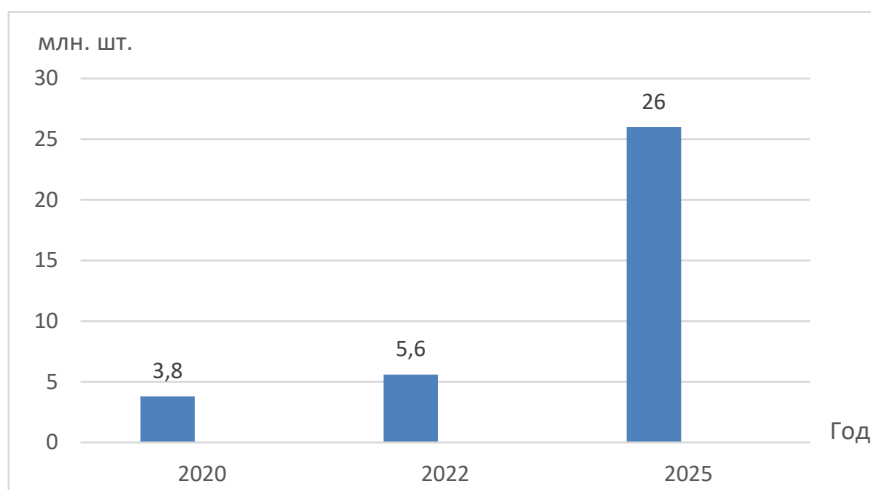


Рис. 1. Рост продаж 3D-принтеров [5]
Fig. 1. Sales growth of 3D printers

Создателем 3D - принтера является Маркус Кайзер, инженер и учащийся в Королевском колледже искусств [2]. Это устройство оснащено солнечным резаком с кулачковым управлением, которое позволяет выполнить как горизонтальные, так и круговые сечения материала, регулируя путь его резки. Для перемещения обрабатываемого материала используется отдельный механизм с малогабаритным мотором, влияющим на работу зубчатого ремня, который, в свою очередь, управляет распределительным валом [6]. Кроме того, в последние годы технологии 3D-печати активно развиваются в различных направлениях. Например:

1. FDM (Fused Deposition Modeling) — метод послойной печати расплавленным термопластиком, который стал основой для большинства бытовых и профессиональных принтеров [7].
2. SLS (Selective Laser Sintering) — метод селективного лазерного спекания порошков для создания сложных конструкций из металла и пластика [8].
3. Bioprinting — печать биоматериалов для создания тканей, органов и прототипов для медицины.

Далее на рис. 2 представлены способы 3D-печати [9].

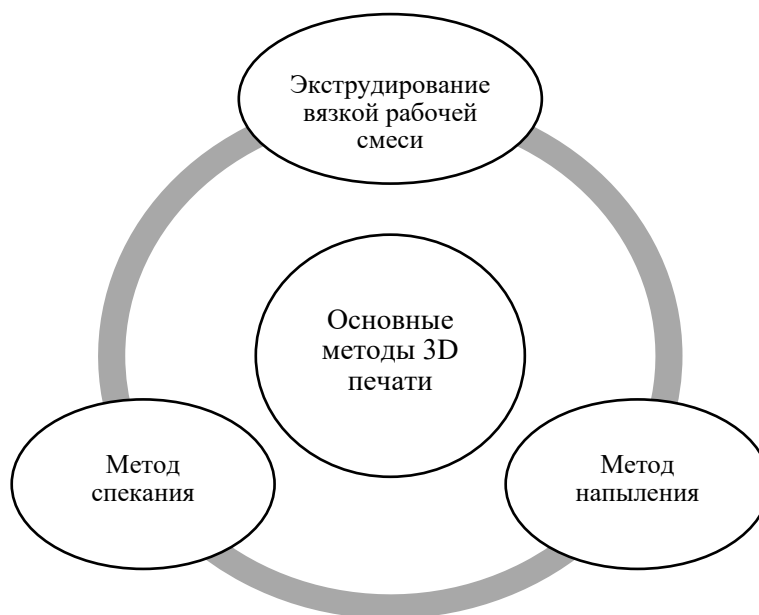


Рис. 2. Основные методы 3D-печати, используемые при строительстве¹
Fig. 2. The main 3D printing methods used in construction

¹ История 3D-печати [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.orgprint.com/wiki/3d-pechat/istorija-3d-pechati> (дата обращения: 19.10.2024)

Все эти три способа 3D-печати существенно позволяют сократить скорость выполнения работ. Этот важный фактор является необходимым условием в рамках трансформационных процессов строительной отрасли [10].

Если рассматривать такой аспект, как финансовые затраты, то в этом случае 3D-печать позволяет повысить производительность строительных работ при возведении домов [11]. За счет автоматизации процессов используется меньше наемного ручного труда, что дает возможность снизить затраты на заработную плату.

Далее в табл.1 можно увидеть сравнение данных показателей с традиционным методом.

Таблица 1. Сравнение уровня финансовых затрат при 3D-печати с традиционным методом [12]

Table 1. Comparison of the level of financial costs in 3D printing with the traditional method

№	Название критерия для сравнения	3D-печать	Традиционный метод
1	Стоимость материалов	20-30 тыс.руб. за кв. м	30-50 тыс. руб. за кв.м
2	Трудозатраты, численность работников	2-3 человека	От 10 до 20 рабочих
3	Сроки выполнения работ	1-3 месяца	6-12 месяцев
4	Общий размер затрат на проект	2-4 млн. руб.	5-10 млн. руб.

Примечание: Данные актуальны на 2024 год.

Итак, на основании данных табл.1, актуальных на декабрь 2024 г., можно сказать, что общие финансовые затраты при использовании технологии 3D-печать значительно ниже, чем в традиционном варианте строительства. Кроме этого, 3D-печать позволяет сократить время выполнения проекта за счет того, что сам процесс печати может длиться всего от 24 до 48 часов, в то время как традиционные методы требуют недель или месяцев [13].

Преимущества использования 3D-печати в строительстве:

1. Экономия материалов. Использование технологии 3D-печати позволяет сократить потребление строительных материалов, таких как цемент, за счет более точного дозирования и минимизации отходов [14].

2. Сокращение необходимости в опалубке. 3D-печатные стены используются как постоянная форма, что снижает затраты на изготовление и демонтаж классической опалубки [15].

3. Экологическая устойчивость. Меньший объем строительного мусора положительно сказывается на экологии и снижает расходы на его утилизацию [16].

4. Компактность стройплощадки. Для хранения материалов и оборудования требуется меньше места, что делает процесс более организованным и менее затратным в логистике [17].

5. Гибкость дизайна. 3D-принтеры позволяют создавать сложные архитектурные формы, которые сложно реализовать с использованием традиционных методов [18].

Принтер AC3D выделяется высокой точностью печати и возможностью работы с различными строительными смесями, включая армированный бетон [19]. Благодаря его использованию строительные компании могут возводить как индивидуальные жилые дома, так и небольшие коммерческие здания.

Практические примеры:

- Компании в Китае и Дубае уже активно используют 3D-принтеры для массового строительства. Например, в Китае было построено целое поселение из домов, напечатанных за одну неделю [20].

- В Дубае реализован проект "Office of the Future", который стал первым в мире полностью 3D-печатным офисным зданием. Его возведение заняло всего 17 дней, а затраты были снижены на 60% по сравнению с традиционными методами [21].

Так в таблице 2 можно увидеть детальное сравнение затрат при 3D-печати дома с использованием принтера AC3D и традиционного метода строительства. Учитывая преимущества 3D-печати, можно утверждать, что эта технология меняет подход к строительству, делая его более экономичным, экологичным и быстрым [22].

Таблица 2. Сравнение затрат при 3D-печати дома с помощью принтера AC3D (в цифрах) и в традиционном строительстве [5]

Table 2. Cost comparison of 3D printing at home using an AC3D printer (in numbers) and in traditional construction

№	Объект (расчет в долл. США)	3D печать	Традиционный способ
1	Фундамент	32 000	32 000
2	Стены	35 000	88 800
3	Кровля	95 000	95 000
4	Инженерные коммуникации	126 000	126 000
5	Отделка (в т.ч. окна и двери)	137 936	137 936
6	Накладные расходы	42 593	95 947
7	Итоговая стоимость	468 529	575 683
8	Цена за кв. фут	250	308

Примечание: Данные актуальны на 2024 год.

Также принтерные стены, созданные посредством 3D-печати, отличаются прочностью, способностью удерживать тепло, звуко- и водонепроницаемостью. Они обладают морозостойкостью. Такие положительные факторы, основанные на прогрессивных компонентах 3D-печати, помогают сократить число сооружений для строительства [17]. При этом удешевление строительных работ составит на 15% - 25% ниже традиционных способов, а качество зданий остается на высоком уровне [23]. Далее в таблице 3 можно увидеть сравнение параметров прочность, теплоизоляция, звуко- и морозостойкость при 3D-печати и традиционном способе.

Таблица 3. Сравнительный обзор 3D-печати и традиционного способа по строительным критериям [5]

Table 3. A comparative review of 3D printing and the traditional method according to building criteria

№	Название параметра	3D печать	Традиционный способ
1	Прочность	Смеси 30-50 МПа	Бетонные стены-около 20-30 МПа
2	Теплоизоляция	Коэф-т теплопроводности 0,8-1,2 Вт/(м·К)	Коэффициент теплопроводности 1,5-2 Вт/(м·К)
3	Звукоизоляция	До 55 дБ	До 50дБ
4	Морозостойкость	F200 и выше (циклов замораживания и оттаивания)	F100 (100 циклов замораживания и оттаивания)

Примечание: Данные актуальны на 2024 год.

Итак, опираясь на результаты сравнительных характеристик при двух способах строительства, можно сказать, что 3D-печать – это на данный момент эффективная альтернатива традиционным методам постройки объектов [24]. Особенно это касается возведения индивидуальных жилых домов. Использование 3D-принтеров большого размера дает возможность непрерывно создавать сооружения высотой до пяти этажей, в то время как более компактные модели принтеров находят свое применение для изготовления строительных блоков, необходимых для возведения зданий [25]. За счет внедрения технологий автоматизации строительство становится менее затратным по времени и труду. Однако пока что технология 3D-печати имеет свои ограничения и не позволяет возводить многоэтажные дома [26].

Разнообразие применения 3D-принтеров в строительстве:

- Крупные 3D-принтеры. Позволяют создавать сооружения высотой до пяти этажей. Такие устройства широко используются для возведения индивидуальных жилых домов, школ и офисных зданий [27].

- Компактные модели. Используются для печати строительных блоков и компонентов, которые затем собираются в готовую конструкцию. Эти блоки могут быть предварительно армированы для повышения прочности [28].

Ограничения технологии на текущем этапе:

- Трудности с многоэтажным строительством. Технология 3D-печати пока не позволяет эффективно возводить здания высотой более пяти этажей из-за ограничений материалов и технических характеристик оборудования [29].

- Дорогостоящее оборудование. Стоимость крупных 3D-принтеров все еще остается высокой, что может быть препятствием для массового внедрения технологии [30].
- Ограниченный выбор материалов. Хотя ведутся исследования по созданию новых смесей, доступный ассортимент материалов, пригодных для 3D-печати, остается сравнительно узким [31].
- Регуляторные барьеры. В некоторых странах отсутствуют четкие строительные нормы и стандарты, регулирующие использование 3D-печати [32].

Сегодня развитие 3D-печати в строительстве невозможно без интеграции передовых систем управления. Строительные 3D-принтеры оснащаются роботизированными решениями, которые обеспечивают не только автоматизацию процесса, но и значительное повышение точности [33]. Например, использование лазерных сканеров и датчиков в реальном времени позволяет адаптировать процесс строительства в зависимости от изменений внешней среды, таких как температура или влажность [34]. В таких регионах, как Арктика или пустынные зоны, 3D-принтеры становятся, возможно, единственным инструментом, способным возводить объекты, соответствующие строгим техническим требованиям. Интеграция с искусственным интеллектом помогает предсказать и предотвратить возможные ошибки в процессе, а также оптимизировать использование ресурсов, что, в свою очередь, минимизирует затраты [35].

Современное 3D развивается нога в ногу с экологической повесткой, поэтому использование переработанных материалов в 3D-печати становится важным шагом в строительной отрасли, где экологические требования становятся всё более актуальными [36]. Примером может служить использование бетона с добавлением переработанных пластиковых отходов, который отличается высокой прочностью и устойчивостью к внешним воздействиям, при этом требуя меньше энергии на производство [36]. Это позволяет существенно снизить углеродный след в процессе строительства.

Одним из значимых преимуществ 3D-печати является её способность адаптироваться к условиям, в которых традиционные строительные методы могут не справиться. Например, в сейсмоактивных регионах, где здания должны быть устойчивыми к землетрясениям, 3D-печать позволяет создавать конструкции с оптимизированной геометрией, которые равномерно распределяют нагрузку и обеспечивают более высокую устойчивость к сейсмическим колебаниям [37]. В Гаити технология 3D-печати использовалась для быстрого строительства временного жилья после землетрясения [7]. Однако, чтобы эти технологии стали полноценной альтернативой традиционным методам, необходимо вкладываться в исследования материалов, которые будут использоваться в 3D-печати [38]. Только качественные и проверенные материалы могут обеспечить требуемую прочность и безопасность зданий, построенных таким методом. Не редко в 3D-печати используют инновационные материалы, таких как бетон с добавлением графена. Этот материал обладает высокой прочностью и долговечностью, что делает его пригодным для строительства в экстремальных условиях [39].

3D-печать в строительстве способствует значительному снижению себестоимости строительства и оптимизации затрат на транспортировку и хранение материалов [40]. Локальное производство строительных компонентов непосредственно на строительных площадках позволяет избежать лишних расходов, связанных с логистикой. Согласно исследованиям, проведённым в Европе, использование строительных 3D-принтеров позволяет сократить общие расходы на проекты до 25% [41].

Барьером для массового внедрения 3D-печати в строительстве является отсутствие единой нормативно-правовой базы. В большинстве стран строительные нормы и правила не учитывают использование аддитивных технологий, что ограничивает их широкое применение на практике. В настоящее время разрабатываются стандарты, которые позволят сертифицировать материалы и конструкции, созданные с помощью 3D-принтеров [42].

Технология 3D-печати продолжает активно развиваться и внедряться в жилищное строительство. Одним из примеров является строительство домов в Китае, где с помощью 3D-принтера было возведено жильё всего за 24 часа. Это подтверждает возможность быстрого и эффективного строительства с использованием данной технологии [43]. 3D-печать уже находит применение в инфраструктурных проектах, таких как строительство мостов, пешеходных переходов и тоннелей. В Нидерландах был построен мост с использованием 3D-принтера, что позволило сократить сроки реализации проекта на 40% [14].

Внедрение 3D-печати в строительную отрасль оказывает влияние на рынок труда. Снижается потребность в неквалифицированной рабочей силе, в то время как увеличивается спрос на инженеров, операторов и программистов, которые управляют процессами печати [44]. Это также подразумевает

необходимость модернизации образовательных программ и подготовки специалистов, способных работать с новыми технологиями [45].

3D-печать активно используется в промышленном строительстве для создания таких объектов, как резервуары и силосы. Это помогает снизить затраты на производство и транспортировку таких конструкций [8]. С учётом удалённости некоторых строительных площадок и трудности в доставке традиционных материалов, 3D-печать становится важным инструментом в промышленном строительстве, предоставляя новые возможности для быстрого и эффективного возведения объектов. Однако 3D-печать в строительстве по-прежнему ограничена по высоте и объёму создаваемых конструкций [46]. В частности, большинство современных строительных 3D-принтеров не способны возводить здания выше пяти этажей [47]. Эти ограничения указывают на необходимость дальнейшего развития технологий масштабирования и улучшения технических характеристик оборудования для расширения возможностей применения 3D-печати в строительстве [48, 49].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

3D-печать в строительстве - это не просто инновация, а ключевая технология, способная значительно изменить подход к процессам возведения объектов. Эта технология имеет потенциал для повышения эффективности, экологичности и экономии времени, что делает её важным элементом в будущем строительной отрасли. В последние годы наблюдается активный рост её применения, что подтверждают данные о количестве устройств на рынке. В 2020 году было продано порядка 3,8 миллионов 3D-принтеров, и по прогнозам, к 2025 году эта цифра достигнет 26 миллионов единиц, что отражает широкое распространение технологии и её интеграцию в различные сферы деятельности.

3D-печать позволяет значительно сократить время выполнения проектов, что является важным фактором в условиях высокой конкуренции в строительной отрасли. Процесс печати может занять всего 24–48 часов, в то время как традиционные методы могут потребовать недель или месяцев [13]. Это сокращение времени не сказывается на качестве и долговечности объектов, что делает технологию выгодной альтернативой традиционным методам.

Среди очевидных преимуществ 3D-печати можно выделить экономию материалов благодаря точному дозированию и минимизации отходов [14], сокращение необходимости в опалубке, что снижает затраты на её изготовление и демонтаж, а также экологическую устойчивость, снижая объём строительного мусора и расходы на его утилизацию [16]. Кроме того, уменьшение требований к пространству для хранения материалов и оборудования способствует оптимизации логистики, а гибкость дизайна позволяет создавать сложные архитектурные формы, невозможные при использовании традиционных методов [18].

Технология 3D-печати уже находит применение в строительстве индивидуальных жилых домов и объектов средней высоты, при этом крупные принтеры позволяют возводить здания высотой до пяти этажей [27], а компактные модели — печатать строительные блоки и компоненты [28]. Внедрение автоматизации процессов строительства снижает трудозатраты и время на возведение объектов, что делает строительство более экономичным и быстрым.

Тем не менее, существуют ограничения для более широкого внедрения 3D-печати в строительной практике. Среди них — трудности с многоэтажным строительством, так как технология пока не позволяет эффективно возводить здания выше пяти этажей из-за ограничений материалов и оборудования [29], высокая стоимость крупногабаритных 3D-принтеров, что может препятствовать массовому внедрению, ограниченный выбор материалов для печати, несмотря на активные исследования [31], а также отсутствие четких строительных норм и стандартов, регулирующих использование 3D-печати в некоторых странах [40].

Несмотря на эти вызовы, будущее 3D-печати в строительстве выглядит обещающим. С развитием инженерных решений и улучшением технологических характеристик оборудования, эта технология займет прочное место в строительной отрасли, становясь стандартом, который будет определять не только методы возведения объектов, но и принципы работы всей строительной индустрии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бенескриптов А.С., Пашин В.И., Марков Н.А. Влияние развития 3D-технологий на современное строительство // Синергия наук. 2017. № 18. С. 832-849.
2. Leach R. The application of 3D printing in construction: Technology, challenges, and opportunities. *Journal of Construction and Building Materials*. 2019. No.35(4), 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.jbuildmat.2019.03.015>

3. Buehler P., Hartmann D. Future trends of 3D printing in construction: A global perspective. *Journal of Construction Technology*, 2020. No.11(2). 76-89.
4. Симакова Е.А., Селякова К.И., Кравченко Д. Применение 3D-печати в строительстве // *Инженерные исследования*. 2021. № 1 (1). С. 3-11.
5. Cavalcante A., Rocha P. Integration of 3D printing with other digital technologies in construction: Challenges and opportunities. *International Journal of Construction Innovation*. 2021. No.8(3). 125-140. <https://doi.org/10.1109/JCI.2021.011235>
6. Zhang L., Wang Z. International experience in 3D printing for construction: Comparative study and lessons learned. *Construction Innovation*. 2020. No.14(1), 5-19. <https://doi.org/10.1108/CI-09-2021-0167>
7. Зорин А.Л. 3D-печать в гуманитарных миссиях // *Социальная инженерия*. 2023. № 2. С. 18–23.
8. Беляков Н.М., Егорова И.В. Применение роботизированных технологий в строительстве: обзор перспектив // *Вестник новых технологий*. 2022. Т. 10. № 3. С. 45–51.
9. Иванов А. П. Экологические аспекты внедрения аддитивных технологий в строительстве // *Архитектура и экология*. 2023. № 6. С. 30–36.
10. Морозов П.Л. Сейсмоустойчивое строительство с применением 3D-принтеров // *Современные инженерные решения*. 2024. Т. 20. № 1. С. 60–67.
11. Аверин К.В. Экономика 3D-печати в строительстве // *Экономика строительства*. 2024. № 1. С. 15–22.
12. Сулейманов Р., Эршменов А. Сравнение традиционных методов строительства и 3D-печати: плюсы и минусы // *Международный научный журнал «Вестник науки»*. 2024. № 10 (79) Т. 4. С. 926-929.
13. Лебедева Ю.А., Чернов М.С. Технологические достижения в области 3D-строительства // *Международный журнал технологий*. 2022. Т. 15. № 4. С. 18–24.
14. Ершов В. К. Применение 3D-печати в инфраструктуре // *Современные транспортные технологии*. 2023. № 8. С. 20–25.
15. Удодов С. А., Белов Ф. А., Золотухина А. Е. 3D-печать в строительстве: новое направление в технологии бетона и сухих строительных смесей: сб. ст. VI Международной научно-практической конференции МЦНС – Наука и просвещение». Пенза, 2017. С. 58–62.
16. Ильин Р. В. Промышленные приложения 3D-печати // *Инженерные материалы*. 2024. № 3. С. 10–15.
17. Козлов Е. С. Технологические ограничения строительной 3D-печати // *Технический вестник*. 2023. № 9. С. 25–30.
18. Лебедева О. М. Устойчивое строительство с использованием аддитивных технологий // *Экоград*. 2023. № 7. С. 40–46.
19. Козлова Н.Ю., Лебедев В.С. Развитие строительных стандартов для 3D-печати // *Технический вестник*. 2023. № 4. С. 20–25.
20. Федоров К.И., Орлова Т.Р. Перспективы применения аддитивных технологий в строительстве // *Строительные технологии*. 2023. Т. 16. № 4. С. 25–30.
21. Власов П.И., Куликов А.Н. Применение 3D-печати в жилом строительстве // *Архитектурные технологии*. 2022. № 3. С. 12–18.
22. Громов Л. В. Графеновые материалы для строительной 3D-печати // *Новые материалы*. 2023. № 4. С. 22–29.
23. Танько В.Д., Калинина Д.А., Савина В.А., Усов М.А., Журавлёва И.А. Тенденции цифровизации в строительной сфере // *Экономика и предпринимательство*. 2021. № 2 (127). С. 184-187.
24. Дмитриев С. А. Автоматизация и рынок труда в строительстве // *Инженерное обозрение*. 2024. № 6. С. 30–37.
25. Иванов К.Л., Смирнова А.В. Применение аддитивных технологий в строительной индустрии // *Инновационные технологии*. 2024. № 5. С. 12–18.
26. Федоров, А. И. Экономические аспекты 3D-печати в строительстве. Москва: МГСУ, 2023. 10 с.
27. Петров М.И., Савельев О.В. Влияние 3D-печати на стоимость строительства // *Экономика и технологии*. 2023. № 3. С. 15–22.
28. Барсова М.Н., Смирнов С.В. Адаптация строительных норм к 3D-печати // *Архитектура и строительство*. 2023. № 5. С. 22–28.
29. Симонова О.В., Берников А.С. Применение 3D-принтеров в гражданском строительстве // *Инженерные исследования*. 2024. № 9. С. 19–23.
30. Дмитриева Т.В., Зуев А.С. Перспективы экологических материалов в 3D-печати // *Экологические инновации*. 2024. № 2. С. 18–25.
31. Павлов А.В., Беляева И.П. Технологии устойчивого строительства с применением 3D-печати // *Строительные инновации*. 2023. № 6. С. 28–34.
32. Сергеев Л.К., Михайлов П.Р. Инженерные особенности 3D-принтеров для строительства // *Современные технологии*. 2023. № 7. С. 30–36.
33. Шевченко А.К., Ширяев Р.В. Перспективы применения 3D-принтеров для строительства многоэтажных зданий // *Строительство XXI века*. 2024. Т. 10. № 3. С. 12–18.
34. Акимов С.А. Влияние автоматизации на развитие строительной 3D-печати // *Строительная техника*. 2023. № 4. С. 12–18.

35. Михайлова Л.В., Титов В.А. Влияние аддитивных технологий на рынок строительных услуг // Современные исследования. 2023. № 2. С. 15–21.
36. Громова Е.П., Сидоров В.Н. Устойчивые строительные материалы для 3D-печати // Экология и производство. 2023. Т. 18. № 2. С. 22–28.
37. Колесников М.И., Щербаков П.В. 3D-печать и будущее строительства в условиях дефицита ресурсов // Прогнозы в строительстве. 2024. Т. 13. № 1. С. 14–20.
38. Яковлев В.С., Кудрявцев В.П. Проблемы автоматизации процессов в строительстве с помощью 3D-принтеров // Журнал строительных технологий. 2023. № 8. С. 8–14.
39. Исаева О.М., Морозов А.В. 3D-печать как инновационная технология для массового жилья // Архитектурное проектирование. 2024. Т. 17. № 2. С. 5–12.
40. Тарасова Ю.П., Громов К.В. Использование новых строительных смесей для 3D-печати // Новые материалы и технологии. 2023. № 11. С. 19–24.
41. Прокофьев К.И., Герасимов И.Л. Перспективы применения 3D-печати в массовом строительстве // Строительные технологии и инновации. 2024. № 3. С. 10–14.
42. Буров Н.С. Нормативно-правовая база аддитивных технологий // Законодательство и инновации. 2023. № 5. С. 45–50.
43. Захарова И.М., Иванов М.И. Экономическое обоснование использования 3D-принтеров в строительстве // Экономика строительства. 2024. Т. 14. № 5. С. 20–25.
44. Петрова С.М., Лебедев И.В. Применение 3D-печати для строительства в отдалённых регионах // Строительный рынок. 2023. № 4. С. 30–36.
45. Князева Е.П., Ильин В.Г. Модернизация строительных процессов с помощью 3D-печати // Научный вестник строительства. 2024. № 4. С. 12–18.
46. Рогова Л.Ю., Белова И.В. Печать зданий с использованием переработанных материалов // Экологическое строительство. 2023. Т. 8. № 1. С. 18–22.
47. Головин А.С., Дьяков И.А. 3D-печать в строительных проектах: опыт и перспективы // Строительство и инновации. 2024. Т. 2. № 1. С. 12–18.
48. Селезнёва Т.А., Орлов А.М. Технологии и инновации в строительстве с применением 3D-принтеров // Журнал новых технологий. 2024. Т. 15. № 7. С. 23–30.
49. Иноземцев А.С., Королев Е.В., Зыонг Тхань Куй. Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 7 (118). С. 863–876. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.863-8761.

ОБ АВТОРАХ

Елизавета Эдуардовна Саркисова – студент магистратуры. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ). 190005, Россия, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4. E-mail: lizasarkicova@mail.ru

ABOUT THE AUTHORS

Elizaveta E. Sarkisova – Graduate student. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU). 190005, Russia, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya str., 4. E-mail: lizasarkicova@mail.ru