

ISSN 2782-5981

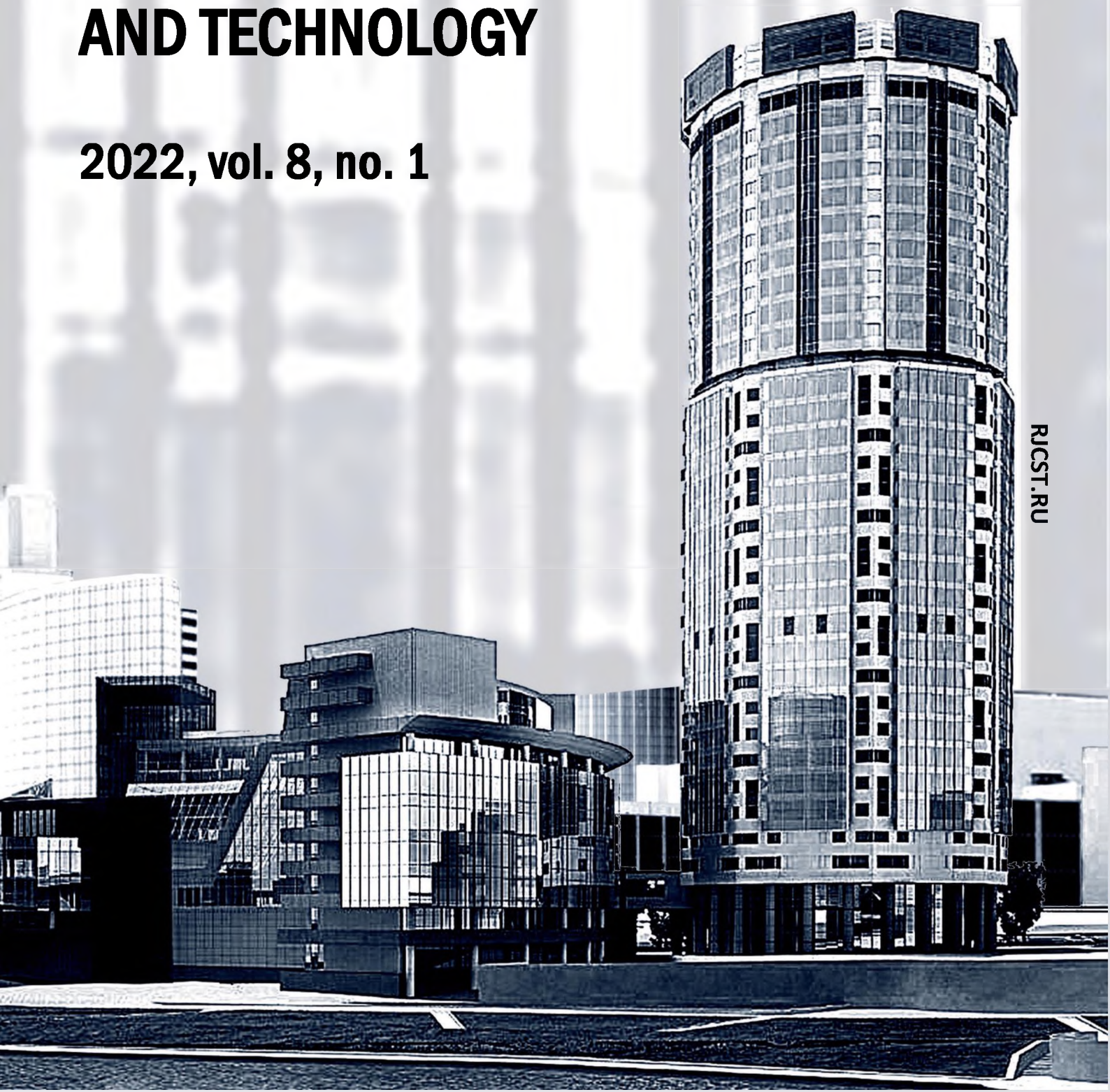
 Ural Federal
University



Institute
of Civil
Engineering
and Architecture

RUSSIAN JOURNAL OF CONSTRUCTION SCIENCE AND TECHNOLOGY

2022, vol. 8, no. 1



RICST.RU



Институт
Строительства
и Архитектуры

**РУССКИЙ ЖУРНАЛ
СТРОИТЕЛЬНЫХ НАУК
И ТЕХНОЛОГИЙ**

2022, том 8, № 1

Editorial policy

Objectives:

- creation of an in-demand platform for specialists to discuss the results of researches in the field of construction sciences and technologies;
- distribution and development of the theoretical and practical knowledge promoting progress in area of construction and civil engineering education;
- promotion of the advanced scientific and technical achievements in the field of structural sciences and technologies.

Strategic tasks:

- informing scientific community and practical workers about advanced theoretical and practical designs in areas connected with production and civil engineering, architecture and town planning, economy, engineering support of construction, safety of structural critical infrastructures, structural materials, computer model operation, etc., and also with searching of new technologies in the annex to structural branch and architecture;
- analysis and development of the best international experience of construction, design of civil engineering objects, their building and operation;
- support of inter-disciplinary approach to problem solving;
- cooperation of researches and engineers of practice in order to improve the outcome of civil engineering industry.

Редакционная политика

Цели:

- создание востребованной специалистами площадки для обсуждения результатов исследований в области строительных наук и технологий;
- распространение и развитие теоретических и практических знаний, способствующих прогрессу в области строительства и строительного образования;
- пропаганда передовых научно-технических достижений в области строительных наук и технологий.

Стратегические задачи:

- информирование научного сообщества и практических работников о новых теоретических и практических разработках в областях, связанных с промышленным и гражданским строительством, архитектурой и градостроительством, экономикой, инженерным обеспечением строительства, безопасностью строительных критических инфраструктур, строительными материалами, компьютерным моделированием и т. п., а также с поиском новых технологий в приложении к строительной отрасли и архитектуре;
- анализ и развитие передового мирового опыта строительства, проектирования объектов строительства, их возведения и эксплуатации;
- поддержка междисциплинарного подхода к решению задач строительства;
- взаимодействие ученых и инженеров в области совершенствования строительного производства.

EDITORIAL COUNCIL

Chairman of the Editorial Council

V. N. Alekhin (Russia)

Deputy Chairman of the Editorial Council

L. F. Boswell (United Kingdom)

P. A. Akimov (Russia)

A. T. Bekker (Russia)

A. V. Dolgov (Russia)

G. V. Mazaev (Russia)

M. B. Permyakov (Russia)

S. P. Postnikov (Russia)

A. A. Starikov (Russia)

S. A. Timashev (Russia)

V. I. Travush (Russia)

D. V. Ulrikh (Russia)

V. Bianco (Italy)

C. D' Mello (United Kingdom)

N. Dawood (United Kingdom)

R. Drochytka (Czech Republic)

D. Lo Presti (Italy)

M. Kassem (United Kingdom)

N. B. Yahaya (Malaysia)

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief

A. S. Noskov (Russia)

Deputy Editor-in-Chief

L. G. Pastukhova (Russia)

Z. V. Belyaeva (Russia)

Executive Secretary

S. S. Novikova (Russia)

Sections:

Education in Civil Engineering and Architecture

L. I. Mironova (Russia)

O. B. Naschetnikova (Russia)

N. P. Nikitina (Russia)

N. P. Shiryayeva (Russia)

Industrial and Civil Engineering and Economics

A. A. Antipin (Russia)

M. K. Kozhevnikova (Russia)

N. I. Fomin (Russia)

Engineering Systems

V. I. Velkin (Russia)

E. V. Migalatiy (Russia)

A. V. Nekrasov (Russia)

A. F. Nikiforov (Russia)

Architecture and Urban Planning

M. U. Ananin (Russia)

N. N. Kaganovich (Russia)

I. A. Tiganova (Russia)

A. V. Khrichenkov (Russia)

Safety of Building Critical Infrastructures and Territories

E. S. Guryev (Russia)

L. V. Poluyan (Russia)

Construction Materials

S. V. Bednyagin (Russia)

F. L. Kapustin (Russia)

Digital Technology in Civil Engineering and Architecture

V. N. Alekhin (Russia)

O. V. Mashkin (Russia)

S. V. Pridvizhkin (Russia)

O. U. Ushakov (Russia)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель редакционного совета

В. Н. Алехин (Россия)

Заместитель председателя редакционного совета

Лоуренс Бозвелл (Великобритания)

П. А. Акимов (Россия)

А. Т. Беккер (Россия)

А. В. Долгов (Россия)

Г. В. Мазаев (Россия)

М. Б. Пермяков (Россия)

С. П. Постников (Россия)

А. А. Стариков (Россия)

С. А. Тимашев (Россия)

В. И. Травуш (Россия)

Д. В. Ульрих (Россия)

В. Бьянко (Италия)

С. Ди Мелло (Великобритания)

Н. Дауд (Великобритания)

Р. Дрохытко (Чехия)

Д. Ло Прести (Италия)

М. Кассем (Великобритания)

Н. Б. Йахайя (Малайзия)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

А. С. Носков (Россия)

Заместитель главного редактора

Л. Г. Пастухова (Россия)

З. В. Беляева (Россия)

Ответственный секретарь

С. С. Новикова (Россия)

Секции:

Образование в строительстве и архитектуре

Л. И. Миронова (Россия)

О. Б. Насчетникова (Россия)

Н. П. Никитина (Россия)

Н. П. Ширяева (Россия)

Промышленное и гражданское строительство и экономика

А. А. Антипин (Россия)

М. К. Кожевникова (Россия)

Н. И. Фомин (Россия)

Инженерное обеспечение строительства

В. И. Велькин (Россия)

Е. В. Мигалатий (Россия)

А. В. Некрасов (Россия)

А. Ф. Никифоров (Россия)

Архитектура и градостроительство

М. Ю. Ананьин (Россия)

Н. Н. Каганович (Россия)

И. А. Тиганова (Россия)

А. В. Хриченков (Россия)

Безопасность строительных критических инфраструктур и территорий

Е. С. Гурьев (Россия)

Л. В. Полуян (Россия)

Строительные материалы

С. В. Беднягин (Россия)

Ф. Л. Капустин (Россия)

Цифровые технологии в строительстве и архитектуре

В. Н. Алехин (Россия)

О. В. Машкин (Россия)

С. В. Придвижкин (Россия)

О. Ю. Ушаков (Россия)

ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО И ЭКОНОМИКА

DOI 10.15826/rjst.2022.1.001

УДК 614.841.332

Мостовских Д. С.¹, Беляева З. В.²

¹ГК «Эффективное проектирование», Екатеринбург, Россия

²Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

e-mail: ¹darya.mostovskikh@gmail.com, ²z.v.believa@urfu.ru

РАСЧЕТ ОГНЕСТОЙКОСТИ НЕСТАНДАРТНЫХ СЕЧЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ANSYS

Аннотация. В работе рассмотрены основные элементы монолитных железобетонных конструкций: плиты, балки и колонны, для которых исследовано поведение под воздействием температуры стандартного пожара. В качестве примера взяты конструкции Международного Медицинского Центра по адресу г. Москва, Западный округ, территория Инновационного Центра «Сколково». Расчет конструкций производился в программном комплексе Ansys Workbench. По результатам теплотехнического расчета построены графики распределения температуры по высоте сечения элементов в зависимости от времени нагрева и предложена оценка огнестойкости на основе критерия потери теплоизолирующих свойств.

Ключевые слова: теплотехнический расчет, железобетонные конструкции, огнестойкость, воздействие стандартного пожара, конструкции Международного медицинского центра (ММЦ) на территории Инновационного центра «Сколково», ANSYS Workbench.

Mostovskikh D. S.¹, Belyaeva Z. V.²

¹«Effective design», Yekaterinburg, Russia

²Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

e-mail: ¹darya.mostovskikh@gmail.com, ²z.v.believa@urfu.ru

CALCULATING FIRE RESISTANCE OF NON-STANDARD CROSS- SECTIONS OF ELEMENTS OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES USING THE ANSYS SOFTWARE COMPLEX

Abstract. The article considers main elements of cast-in-place reinforced concrete structures: slabs, beams and columns. Their behavior under temperature conditions of a standard fire has been studied. As an example structures of the International Medical Center in Moscow, Western District, the territory of the Innovation Center "Skolkovo" were considered. The software ANSYS Workbench was used for calculation of structures. According to the results of the thermo technical calculation, graphs of temperature distribution over the section height of the elements as a function of heating time are plotted and an assessment of fire resistance based on the criterion of loss of heat-insulating properties is proposed.

Keywords: thermo technical calculation, reinforced concrete structures, fire resistance, exposure of standard fire, constructions of International Medical Center (IMC) on the territory of Skolkovo Innovation Center, ANSYS Workbench.

1. Введение

Возникновение пожара всегда связано с большим ущербом, причиненным жизни и имуществу. Статистика пожаров в России отражает текущее состояние процессов обеспечения пожарной безопасности в стране. Зачастую многие люди погибают в результате обрушения несущих конструкций здания. По данным МЧС [1] на пожары, возникшие в зданиях и сооружениях, приходится максимальное число погибших — около 95% от всех погибших по России. Поэтому большая роль отводится капитальному строительству, улучшению его качества, которое характеризуется также надежностью работы строительных конструкций в условиях возможного пожара, т. е. их огнестойкостью. При проектировании зданий и сооружений применяются различные конструкции и материалы, которые должны обладать заданными противопожарными характеристиками. Данное требование обеспечения сохранности конструкций и их прочностных свойств при воздействии

пожара является обязательным в соответствии с Техническим регламентом о требованиях пожарной безопасности [2].

На рисунках 1-2 приведены общие тенденции и динамика числа пожаров, ущерба, гибели людей в период с 2016 по 2020 гг.

На сегодняшний день благодаря своим преимуществам железобетон является основным строительным материалом для всех типов сооружений. Понимание основ поведения такого материала при нагружении, термическом воздействии и влиянии окружающей среды позволяет создавать более эффективные и безопасные формы элементов, осуществлять прогнозирование эксплуатационных свойств и проводить оптимизации конструкции на основе заданных критериев. Вопросы расчета железобетонных конструкций на воздействие нагрева при пожаре исследуются российскими и зарубежными учеными уже не одно десятилетие [3-19].

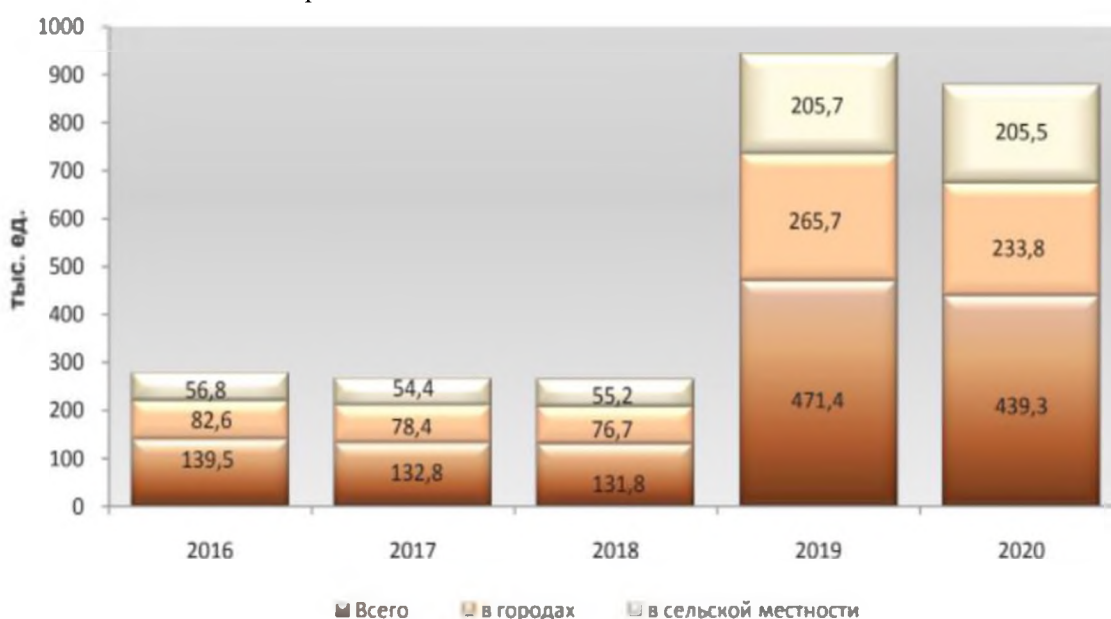


Рис. 1. Количество пожаров в период с 2016 по 2020 гг. [1]



Рис. 2. Численность погибших при пожарах в период с 2016 по 2020 гг. [1]

Решение задачи нестационарной теплопроводности сводится к определению температуры по сечению конструкции в процессе воздействия на нее стандартного температурного режима. Изменение температуры в твердых телах рассчитывают путем решения дифференциального уравнения теплопроводности Фурье при нелинейных граничных условиях и сложном процессе тепло – и массопереноса. Для плит перекрытий, колонн и балок принимаем, что температура в конструкции изменяется только по поперечному сечению элементов, так как один размер конструкции значительно больше или меньше двух других. Тогда температурное поле у таких конструкций является двухмерным и выражается уравнением Фурье [20]:

$$c_t \gamma_t \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_t \frac{\partial t}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_t \frac{\partial t}{\partial y} \right],$$

где c_t – удельная теплоемкость бетона в зависимости от температуры, Дж/(м · °С);

γ_t – удельный вес бетона, кг/м³;

t – температура, °С;

τ – время, сек;

λ_t – коэффициент теплопроводности бетона в зависимости от его температуры, Дж/(м · °С · с)

Однако данная постановка задачи нестационарной теплопроводности сложна для повседневной инженерной

практики, проблематика которой достаточно полно описана в литературе [21]. С целью упрощения решения разработаны различные методы, в которых не рассматривается целый ряд практических задач, что ограничивает область их применения.

Модели из объемных элементов позволяют получить наиболее полные данные о напряженно-деформированном состоянии железобетонной конструкции. С целью снижения трудоемкости и повышения эффективности проведения анализа используется метод конечных элементов (МКЭ), который позволяет анализировать сложные системы с многообразием взаимосвязей между элементами внутри модели и внешним воздействием окружающей среды. В данной работе были выполнены теплотехнические расчеты железобетонных конструкций в программной среде Ansys Workbench, как одной из наиболее совершенной и наиболее известной в области расчета конструкций из нелинейно работающих материалов.

2. Теплотехнические расчеты

Огнестойкость железобетонных конструкций утрачивается, как правило, в результате потери несущей способности (обрушения) за счет снижения прочности, теплового

расширения и температурной ползучести арматуры и бетона при нагревании.

В общем случае расчет состоит из двух частей: теплотехнической и статической. Воздействие «стандартного пожара» на конструкцию задается граничным условием 3-го рода, которое характеризуется изменением

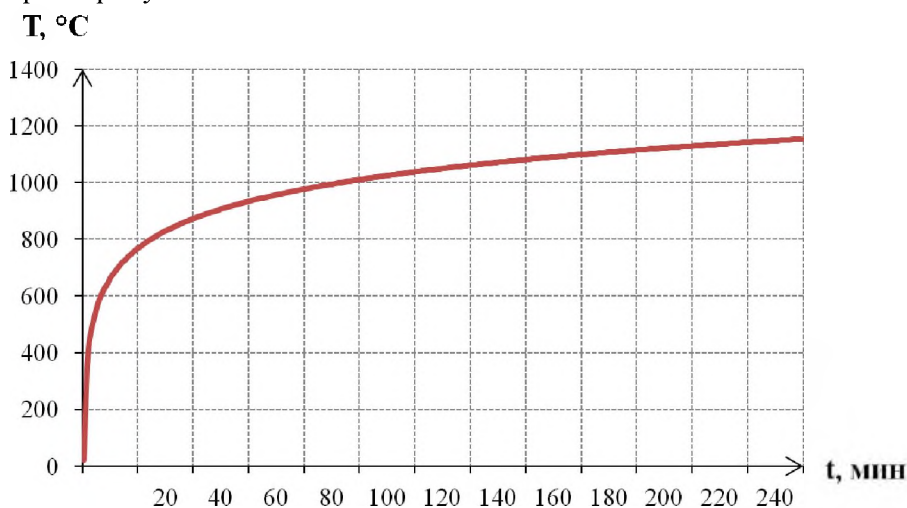


Рис. 3. Стандартная температурная кривая газовой среды в условиях пожара при начальной температуре $t = 22^\circ\text{C}$ (авторская схема)

Полный тепловой поток к обогреваемой поверхности со стороны внешней тепловой нагрузки осуществляется по двум механизмам [22]:

$$q_f = q_{kf} + q_{lf},$$

где q_{kf} – тепловой поток за счет конвективного теплообмена,

q_{lf} – тепловой поток за счет излучения,

Конвективная составляющая полного теплового потока к обогреваемой поверхности конструкции рассчитывается по закону Ньютона:

$$q_{kf} = \alpha_f (T_f - T_w),$$

где α_f – коэффициент конвективного теплообмена между газовой средой и обогреваемой поверхностью конструкции: $\alpha_f = 29 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$;

T_f – температура газовой среды;

T_w – температура обогреваемой поверхности.

температуры во времени согласно уравнению (рис. 3) [20]:

$$t = t_0 + 345 \lg(0,133\tau + 1),$$

где t – температура пожара, $^\circ\text{C}$;

t_0 – температура окружающей среды (начальная температура пожара), принимаем $t_0 = 22^\circ\text{C}$;

τ – продолжительность пожара, сек.

На стадии развитого пожара в случае оптически плотной газовой среды плотность результирующего потока излучения к поверхности конструкции в зависимости от локальной температуры среды в окрестности рассматриваемого элемента поверхности рассчитывается по формуле:

$$q_{lf} = A_f \sigma (T_f^4 - T_w^4),$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$;

A_f – приведенная степень черноты газовой среды и поверхности:

$$A_f = \frac{1}{\left(\frac{1}{\varepsilon_f} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1\right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{0,85} + \frac{1}{0,85} - 1\right)} = 0,739;$$

ε_f – интегральный коэффициент излучения газовой среды, $\varepsilon_f = 0,85$;

ε_w – интегральный коэффициент излучения поверхности, для бетона $\varepsilon_w = 0,85$;

T_f – локальная температура в окрестности рассматриваемого элемента поверхности (на внешней границе теплового пограничного слоя).

Рассмотрим особенности теплотехнического расчета на примере конструкций ММЦ в «Сколково»: монолитных железобетонных плит, балок и колонн. Задачу нестационарной теплопроводности решим в модуле Transient Thermal в пакете Ansys Workbench.

2.1. Монолитная железобетонная плита перекрытия

Перекрытия ММЦ представляет собой монолитную железобетонную плиту толщиной 240 мм с капителями в зоне колонн и с сеткой осей (пролетом) 7,8×7,8 м. Основные параметры плиты представлены в таблице 1. Размер сетки конечных элементов для плиты принят 50 мм. Общий вид плиты перекрытия в виде конструктивных и конечных элементов показан на рисунках 4 и 5 соответственно.

Таблица 1

Параметры плиты перекрытия

№ п/п	Параметр	Значение
1	Материал плиты, бетон	B35
2	Толщина плиты (t), мм	240
3	Пролет (L), мм	7800
4	Расчетная ширина плиты (b), мм	7800
5	Фоновое верхнее, нижнее армирование плиты: диаметр арматуры, мм шаг арматуры, мм класс арматуры	12 200 A500C
6	Расстояние от нижней грани до центра сечения арматуры (a), мм	30
7	Толщина защитного слоя бетона, мм	24

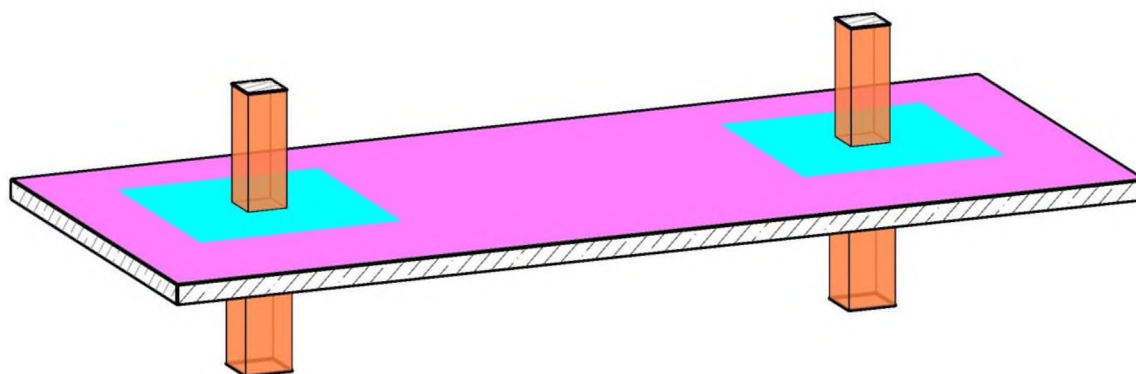


Рис. 4. Общий 3D вид плиты перекрытия в виде конструктивных элементов

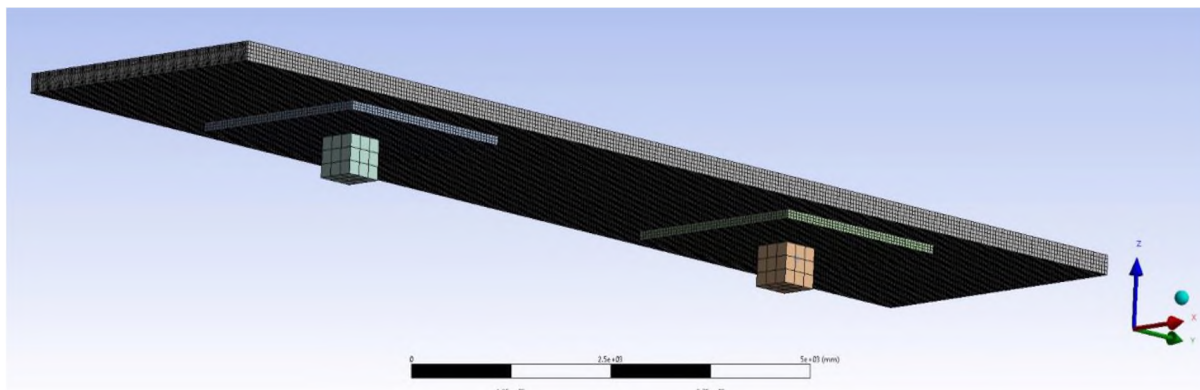


Рис. 5. Общий 3D вид плиты перекрытия в виде конечных элементов

Нагрев плиты осуществляется равномерно по всей длине со стороны нижней поверхности, температура которой соответствует температуре стандартного пожара. В модельной задаче плиту нагревали в течение 200 минут. Минимальный предел огнестойкости плиты перекрытия должен быть не менее 120 минут (120REI) согласно [2]. В результате расчета для любого момента времени нагрева были получены температурные поля в сечении плиты (рис. 6).

Для плиты толщиной 240 мм температура в точках сечения по высоте на всем интервале времени нагрева представлена на рис. 7. Значение температуры на обогреваемой поверхности плиты (линия 0 мм) изменяется согласно воздействию стандартного пожара. Линия, обозначаемая 240 мм, на графике соответствует не обогреваемой поверхности плиты перекрытия.

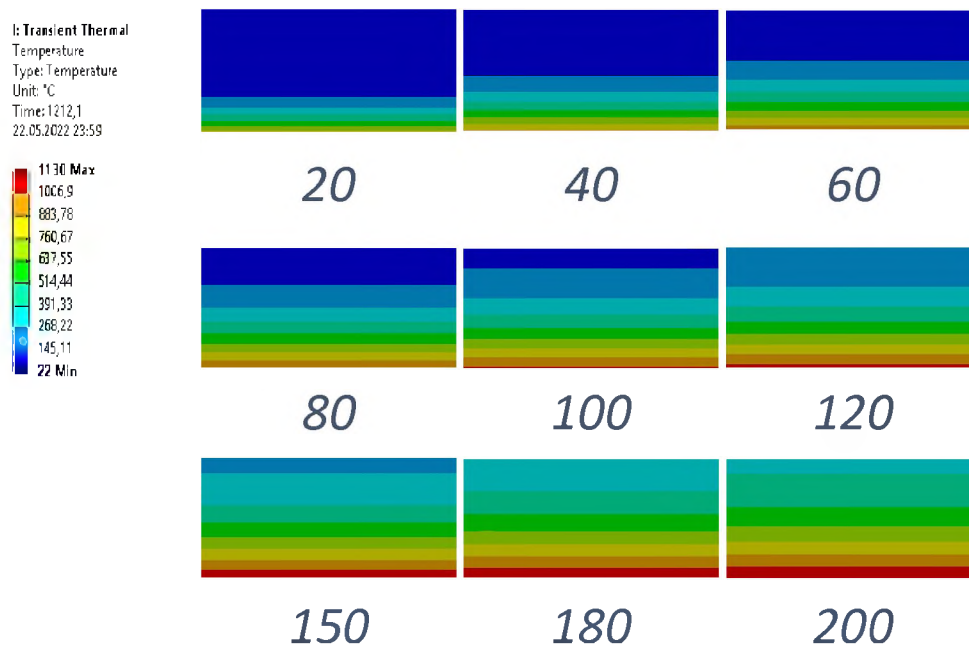


Рис. 6. Температурные поля в сечении плиты перекрытия при 20, 40, 60, 80, 100, 120, 150, 180 и 200 минутах нагрева

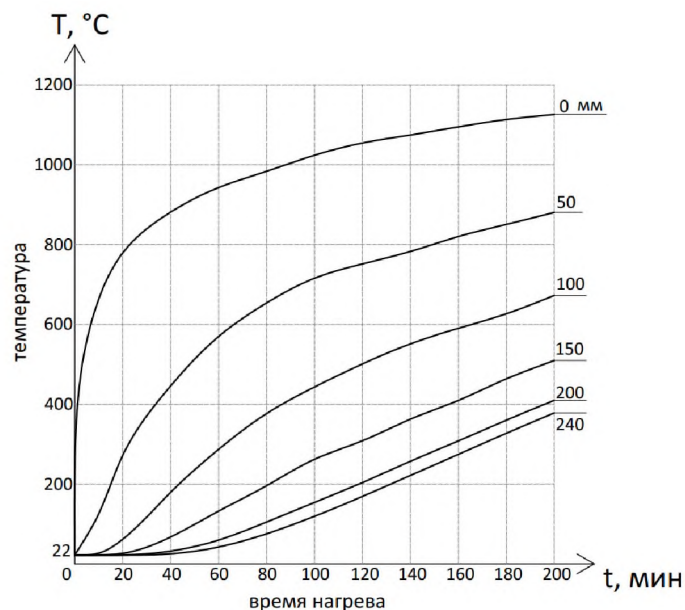


Рис. 7. Зависимость температуры в точках, расположенных по высоте сечения от времени нагрева

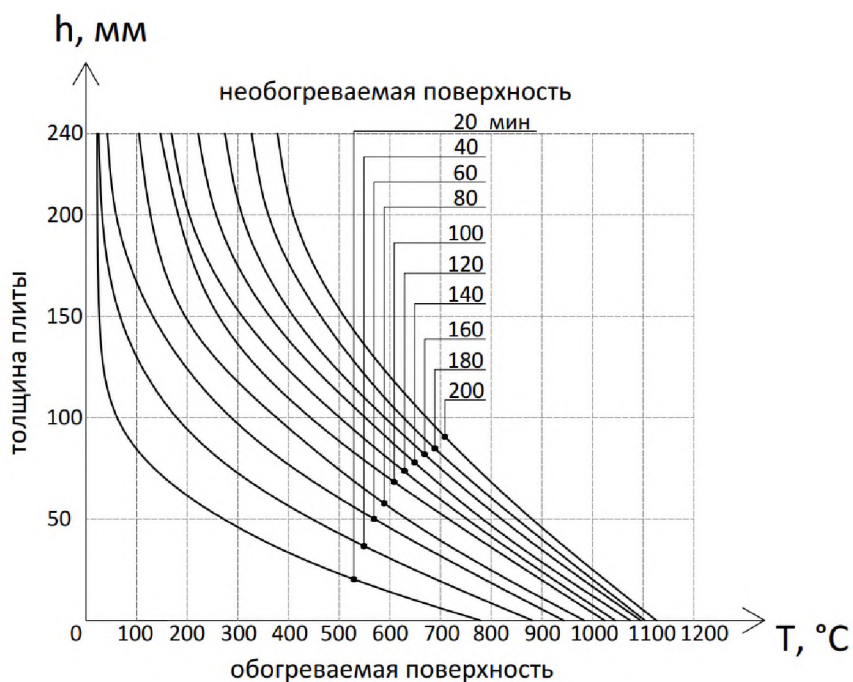


Рис. 8. Распределение температуры по высоте сечения в зависимости от времени нагрева

Данные по температурным полям в плите, а именно график распределения температуры по высоте сечения в зависимости от времени нагрева (рис. 8), позволяют дать оценку огнестойкости плиты по потере теплоизолирующей способности. При повышении температуры на необогреваемой поверхности до 160 °C

наступает предел огнестойкости конструкции по потере теплоизолирующей способности [23]. Исходя из графика видно, что потеря теплоизолирующих свойств плиты происходит на 120 минуте пожара, что не меньше предела огнестойкости (120I).

2.2. Монолитная железобетонная балка

Данная балка является одним из самых важных несущих элементов в медицинском центре, так как в середину ее пролета приходит колонна от вышележащих этажей.

Сечение балки 2200x1000 мм, пролет 15,6 м, нижнее армирование представлено 5-ю рядами. Параметры балки представлены в таблице 2. Общий вид балки в виде конструктивных и конечных элементов показан на рис. 9 и 10 соответственно.

Таблица 2

Параметры балки

№ п/п	Параметр	Значение
1	Материал балки, бетон	B35
2	Геометрические параметры балки:	
	– высота (h), мм	2200
	– ширина (b), мм	1000
	– свес полки (l_1), мм	1000
3	Пролет (L), мм	15600
4	Верхнее армирование балки:	
	– диаметр арматуры, мм	32
	– количество в одном ряду, шт.	10
	– число рядов, шт.	2
	– класс арматуры	A500C
5	Промежуточное армирование балки:	
	– диаметр арматуры, мм	32
	– количество в одном ряду, шт.	6
	– число рядов, шт.	3
	– класс арматуры	A500C
6	Нижнее армирование балки:	
	– диаметр арматуры, мм	40
	– количество в одном ряду, шт.	10
	– число рядов, шт.	5
	– класс арматуры	A500C
7	Поперечное армирование балки:	
	– диаметр хомутов, мм	16
	– шаг хомутов, мм	200
	– количество хомутов в сечении, шт.	3
	– класс арматуры	A500C
8	Расстояние от нижней грани до центра сечения арматуры (a), мм	70
9	Толщина защитного слоя бетона, мм	50

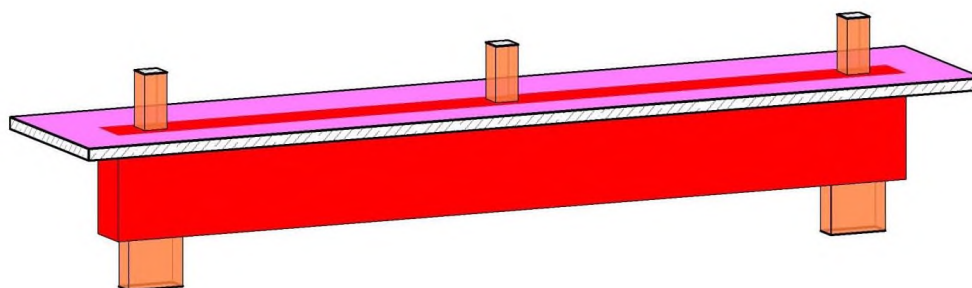


Рис. 9. Общий 3D вид балки в виде конструктивных элементов

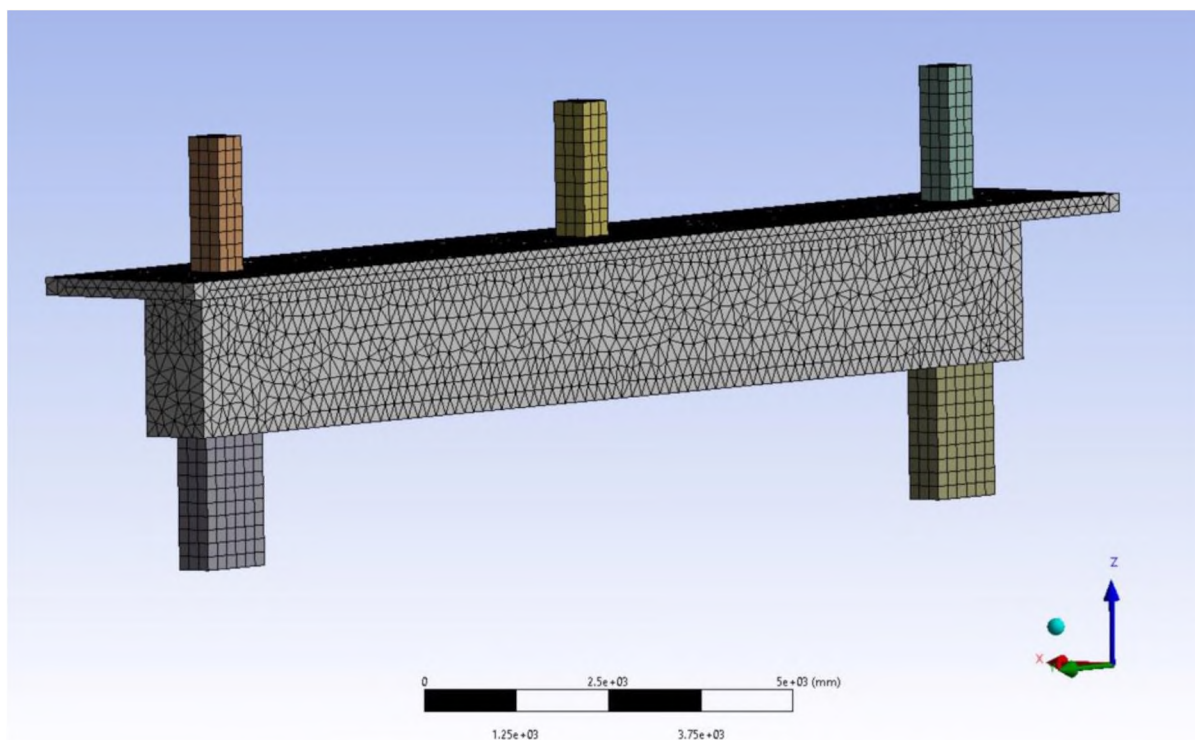


Рис. 10. Общий 3D вид балки в виде конечных элементов

Теплотехнический расчет для монолитной железобетонной балки производился по такому же принципу, как и для плиты перекрытия. Отличие состоит в том, что нагрев балки осуществляется равномерно по всей длине со стороны 3-х сторон: нижней и двух боковых поверхностей. В модельной задаче балку нагревали в течение 200 минут. Размер сетки конечных элементов для балки также принят 50 мм.

Рассмотрим температурные поля в балке при разных временах нагрева. На рис. 11 показаны поперечные сечения балки, которые разделены вертикальной осевой линией пополам, так чтобы можно было сопоставить температурные поля при различных временах нагрева.

По рис. 13 можно предположить, что огнестойкость балки будет утрачена вследствие потери несущей способности, а не теплоизолирующей

способности, так как сечение балки является массивным.

2.3 Монолитная железобетонная колонна

Аналогичным образом определим температурные поля для колонны при ее четырехстороннем нагреве с помощью теплового воздействия стандартного пожара. Геометрия колонны представляет изменяющееся по высоте сечение. Параметры колонны представлены в таблице 3. Общий вид колонны в виде конструктивных и конечных элементов показан на рис. 14.

На рис. 15 показаны нижнее, среднее и верхнее поперечные сечения колонны, разделенные осевой линией пополам. На рис. 16 аналогично показаны продольные сечения колонны. Очевидно, что наиболее опасным является нижнее сечение колонны, как с точки зрения прогрева, так и с точки зрения прочностного анализа.

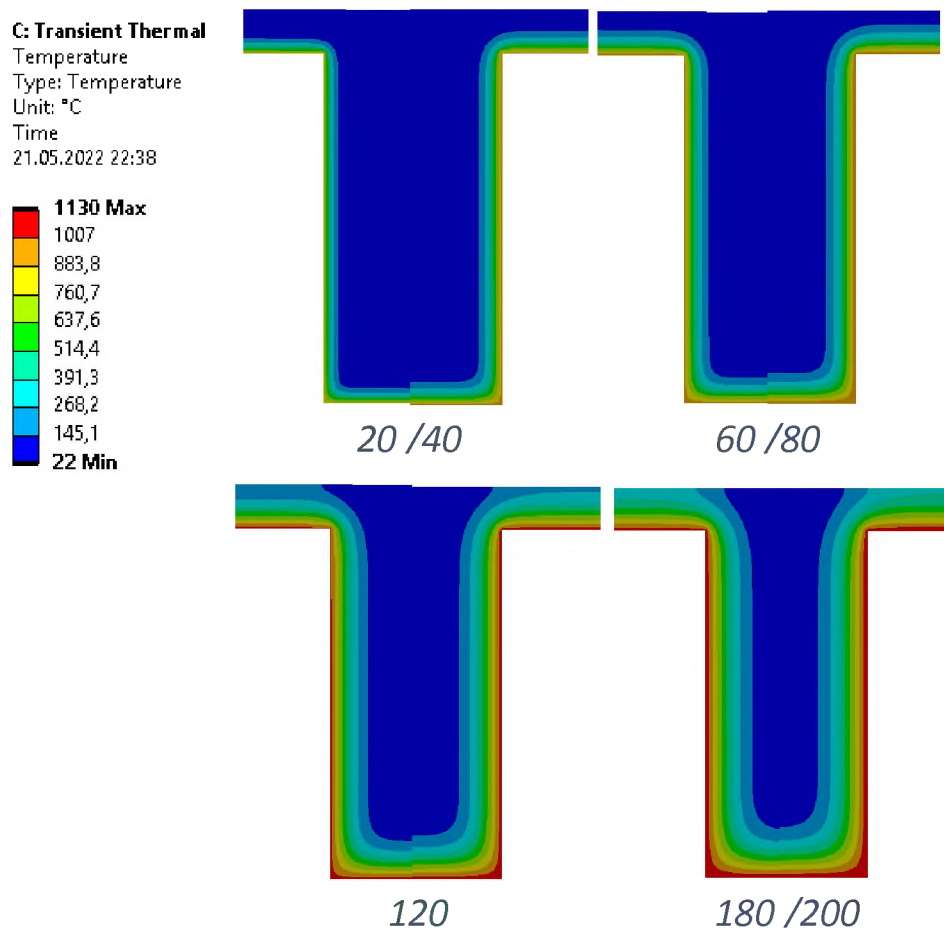


Рис. 11. Температурные поля в сечении балки при 20, 40, 60, 80, 120, 150, 180 и 200 минутах нагрева

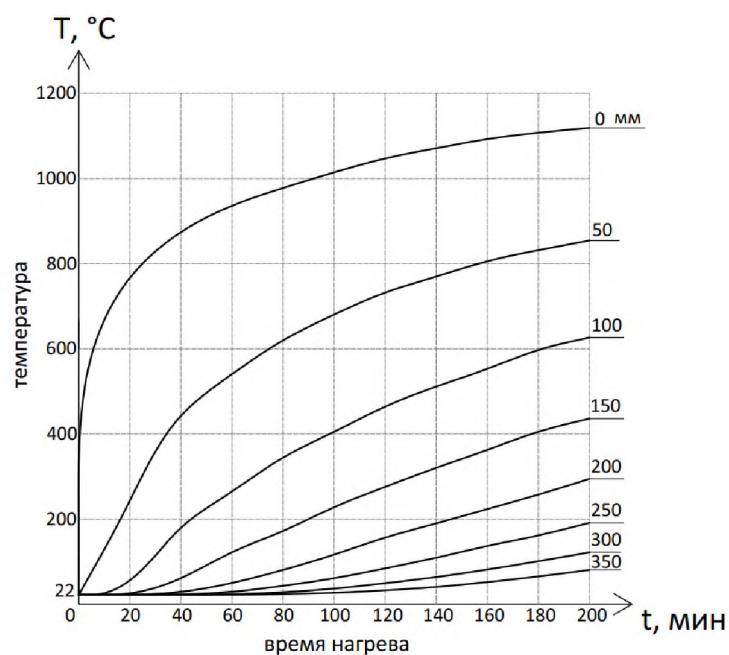


Рис. 12. Зависимость температуры в точках, расположенных по ширине сечения от времени нагрева

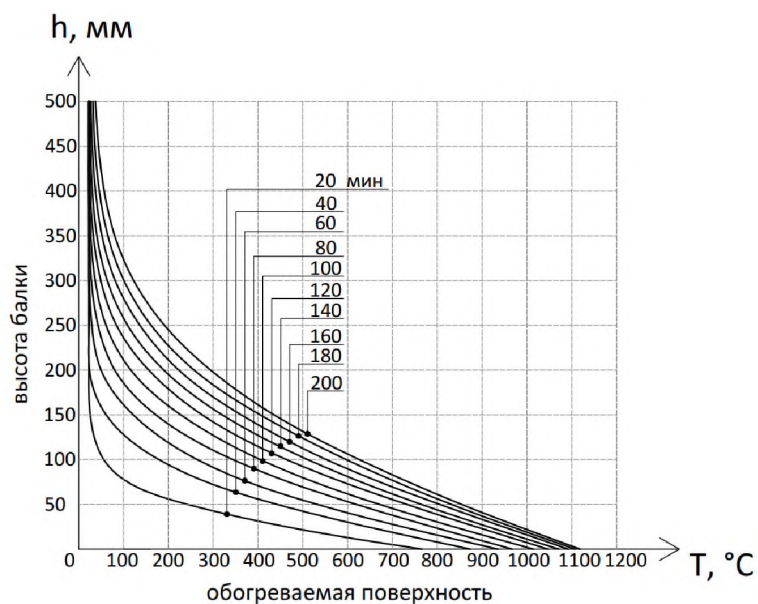


Рис. 13. Распределение температуры по ширине сечения в зависимости от времени нагрева

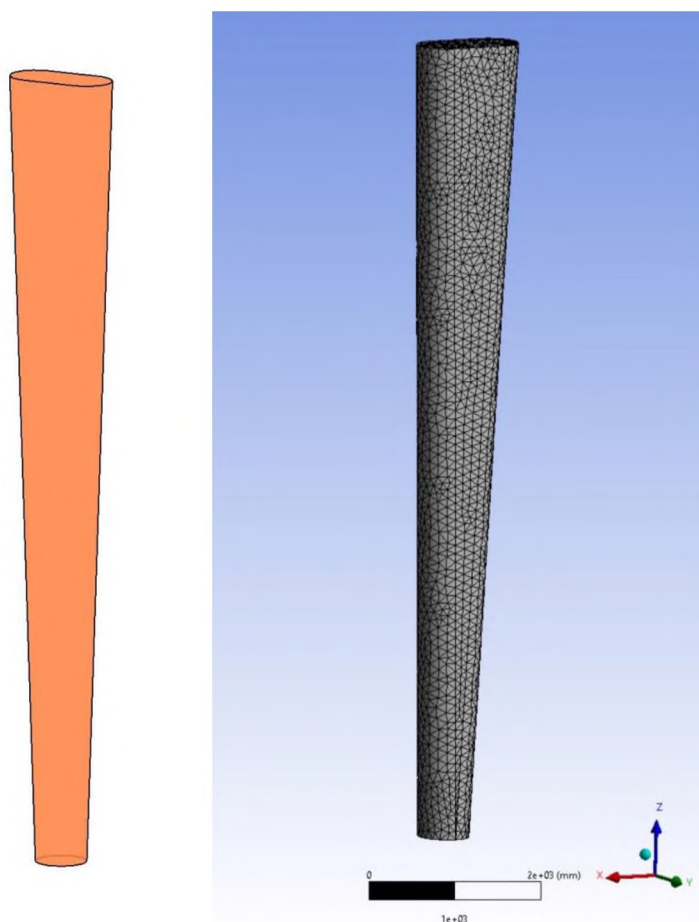


Рис. 14. Общий 3D вид колонны в виде конструктивных и конечных элементов соответственно

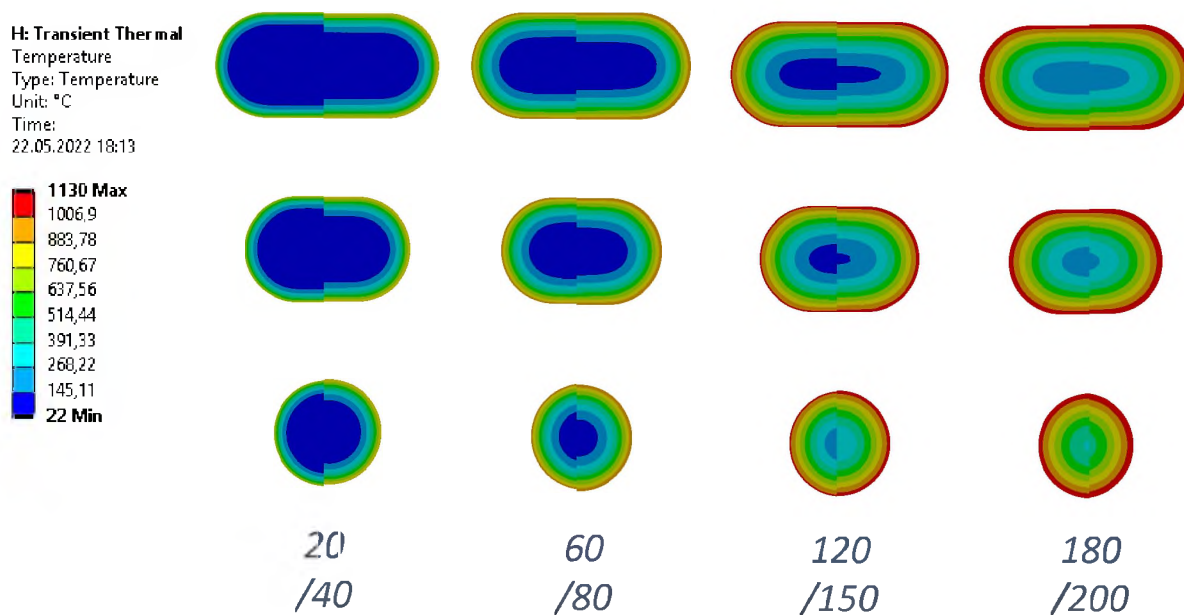


Рис. 15. Температурные поля в поперечном сечении колонны при 20, 40, 60, 80, 120, 150, 180 и 200 минутах нагрева

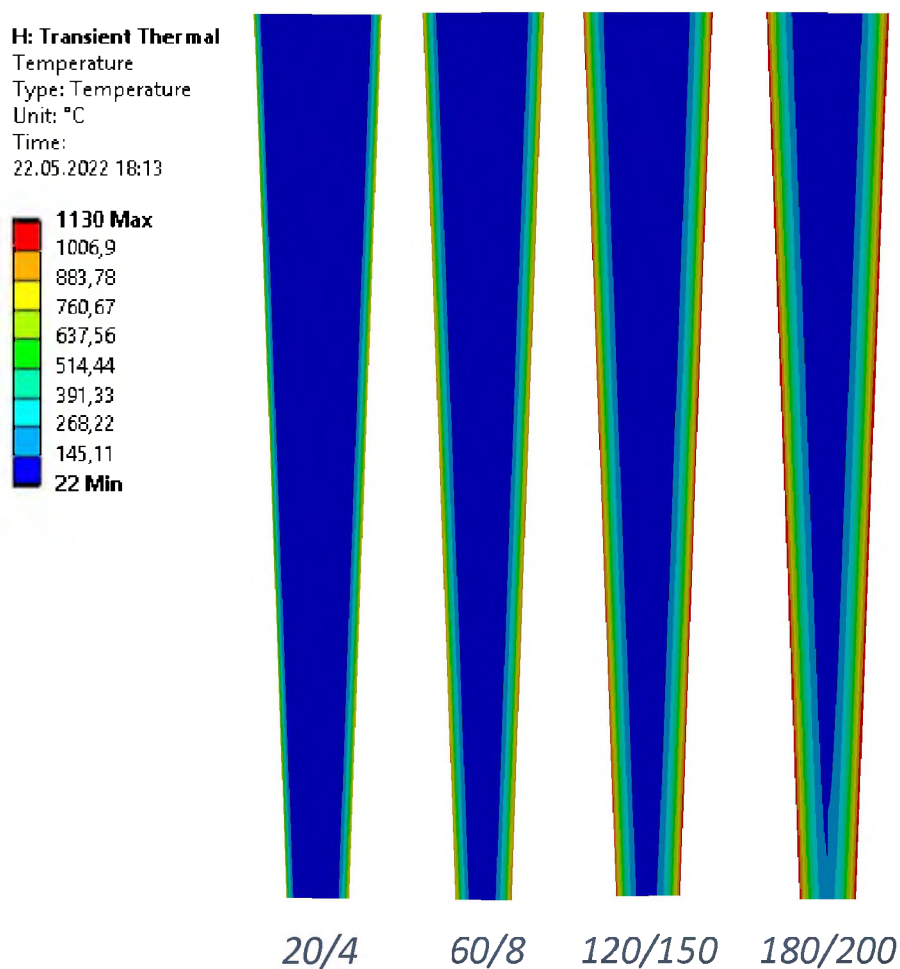


Рис. 16. Температурные поля в продольном сечении колонны при 20, 40, 60, 80, 120, 150, 180 и 200 минутах нагрева

Таблица 3

Параметры колонны

№ п/п	Параметр	Значение
1	Материал плиты, бетон	B70
2	Геометрические параметры колонны: – высота (h), мм – нижнее сечение – окружность диаметром (d), мм – верхнее сечение - овал сечением ($a \times b$), мм	9350 600 1280×600
3	Армирование ствольной части колонны: – диаметр арматуры, мм – количество, мм – класс арматуры	32 12 A500C
4	Армирование боковых частей колонны: – диаметр арматуры, мм – количество, мм – класс арматуры	32 12 A500C
5	Поперечное армирование колонны: – диаметр хомутов, мм – шаг хомутов, мм – класс арматуры	10 250 A500C
6	Расстояние от грани до центра сечения продольной арматуры (a), мм	70
7	Толщина защитного слоя бетона, мм	54

3. Заключение

В данной работе была решена задача нестационарной теплопроводности в программном комплексе ANSYS Workbench, были получены температурные поля при воздействии стандартного пожара, графики распределения температуры в зависимости от времени нагрева для основных несущих железобетонных элементов ММЦ: плиты перекрытия, балки, колонны. По результатам расчета предложена оценка огнестойкости конструкций на основе критерия потери теплоизолирующих свойств. Предел огнестойкости по потере теплоизолирующей способности: для плиты перекрытия происходит на 120 минуте пожара, для балки не наступает при нагреве в течении 200 минут, для колонны не нормируется.

Список используемых источников

1. Пожары и пожарная безопасность в 2020 году. Статистический сборник / П. В. Полехин, М. А. Чебуханов, А. А. Козлов, А. Г. Фирсов, В. И. Сибирко, В. С. Гончаренко, Т. А. Чечерина

под ред. Д. М. Гордиенко. Москва: ВНИИПО, 2021. 112 с.

2. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности. Федеральный закон Российской Федерации от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ // Введ. 2009-05-01. Российская газета, 2008. 1 августа.

3. Теплотехнический расчет огнестойкости элементов железобетонных конструкций с использованием программной среды ANSYS / А. В. Ширко, А. Н. Камлюк, И. И. Полевода, Н. В. Зайнудинова // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. 2013. № 2(18). С. 260–269.

4. Яковлев А. И. Расчет пределов огнестойкости сжатых железобетонных конструкций по критическим деформациям // Сборник научных трудов «Поведение строительных конструкций в условиях пожара». Москва: ВНИИПО, 1987. С. 5-16.

5. Ефименко А. З., Ройтман В. М. Исследование влияния температуры на теплопроводность бетонов // Сборник научных трудов Института строительства и архитектуры МГСУ. Московский Государственный строительный университет, 2008. Выпуск 1. С.22-24.

6. Бардин А.В. Моделирование пожарной нагрузки на конструкции в программном комплексе ANSYS // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 6(45). С. 55-67.

7. Камлюк А. Н., Ширко А. В., Полевода И. И. Модели материалов арматуры и бетона для теплотехнических и прочностных расчетов на примере российского стандарта // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. 2013. № 1(17). С. 104–116.

8. СП 468.1325800.2019. Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности. Введ. 2020-06-11. Москва: Минстрой России, 2019. 107 с.

9. Пособие к СНиП II-2-80 по определению пределов огнестойкости конструкций, пределов распространения огня по конструкциям и групп возгораемости материалов. Москва: Стройиздат, 1985. 55 с.

10. El-Fitiany S. F., Youssef M. A. Simplified Method to Analyze Continuous Reinforced Concrete B // Aci Structural Journal, 2014. Sci. 111(1). P. 145-156.

11. Construction application of Fibre. Mesh method for protecting concrete columns in fire / Y-S. Heo, J. G. Sanjayan, C. G. Han, M. C. Han // Construction and Building Materials, 2011. 25(6). P. 2928–2938.

12. Youssef M. A., El-Fitiany S. F., Elfeki M. A. Flexural Behavior of Protected Concrete Slabs after Fire Exposure // Designing Concrete Structures for Fire Safety, 2008. P. 47-74.

13. Youssef M. A., Moftah M. General Stress-Strain Relationship for Concrete at Elevated Temperatures // Engineering Structures, 2007. 29(10). P. 2618-2634.

14. Willam K. J., Warnke E. P. Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete // Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering, 1975. 19. P. 174.

15. Phan L. T., Carino N. J. Review of Mechanical Properties of HSC at Elevated Temperature // ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, 1998. 10(1). P. 58-64.

16. Abrams M. S. Compressive Strength of Concrete at Temperatures to 1600°F // Temperature and Concrete (Special Publication American Concrete Institute), 1971. 25. P. 33-59.

17. Hertz K. D. Concrete strength for fire safety design // Mag Concrete Res, 2005. 57(8). P. 445-453.

18. Malhotra H. L. Effect of Temperature on the Compressive Strength of Concrete // Mag Concrete Res, 1956. 8. P. 85-94.

19. Anderberg Y., Thelandersson S. Stress and Deformation Characteristics of Concrete at High Temperatures: 2 Experimental Investigation and Material Behaviour Model // Bulletin 54. Sweden, Lund: Lund Institute of Technology 1976.

20. Яковлев А. И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. Москва: Стройиздат, 1988. 143 с.

21. Белов В. В., Семенов К. В., Ренев И. А. Огнестойкость железобетонных конструкций: модели и методы расчета // Magazine of civil engineering. 2010. №6.

22. Учебно-методическое пособие в помощь специалистам проектных и монтажных организаций. Раздел I: Противопожарная защита высотных зданий и уникальных объектов. Москва: ООО ПКФ «Эндемик», 2004. 85 с.

23. СТО 36554501-006-2006. Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций. Введ. 2006-10-20. Москва: ФГУП «НИЦ Строительство», 2006. 77 с.

References

1. Polekhin P. V. et al. (2021). Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2020 godu. Statisticheskij sbornik [Fires and fire safety in 2020. Statistical collection]. Moscow: VNIPO. P. 112 (In Russian).
2. Tekhnicheskij reglament o trebovaniyah pozharnoj bezopasnosti. Federal'nyj zakon Rossijskoj Federacii ot 22 iyulya 2008 g. № 123-F (2008). [Technical regulation on fire safety requirements. Federal Law of the Russian Federation of July 22, 2008 N 123-FZ]. Introduction. 2009-05-01. Russian newspaper, August 1 (In Russian).
3. Shirko A. V., Kamlyuk A. N., Polevoda I. I., Zainudinova N. V. (2013). Teplotekhnicheskij raschet ognestojkosti elementov zhelezobetonnyh konstrukcij s ispol'zovaniem programnoj sredy ANSYS [Thermotechnical calculation of fire resistance of elements of reinforced concrete structures using the ANSYS software environment]. Bulletin of the Command and Engineering Institute of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus. N 2(18). P. 260–269. (In Russian).
4. Yakovlev A. I. (1987). Raschet predelov ognestojkosti szhatyh zhelezobetonnyh konstrukcij po kriticheskim deformacijam [Calculation of fire resistance limits of compressed reinforced concrete structures according to deformation costs]. Collection of scientific papers «Behavior of building structures in fire conditions». Moscow: VNIPO. P. 5-16. (In Russian).
5. Efimenko A. Z., Roytman V. M. (2008). Issledovanie vliyaniya temperatury na teploprovodnost' betonov [Study of the effect of temperature on the thermal conductivity of concrete]. Collection of scientific works of the Institute of Construction and Architecture MGSU.

Moscow State University of Civil Engineering. Issue 1. P. 22-24. (In Russian).

6. Bardin A.V. (2016). Modelirovanie pozharnoj nagruzki na konstrukcii v programmnom komplekse ANSYS [Modeling fire load on structures in the ANSYS software package]. Construction of unique buildings and structures. N 6(45). P. 55-67. (In Russian).

7. Kamlyuk A.N., Shirko A.V., Polevoda I.I. (2013). Modeli materialov armatury i betona dlya teplotekhnicheskikh i prochnostnyh raschetov na primere rossijskogo standarta [Models of reinforcement and concrete materials for heat engineering and strength calculations on the example of the Russian standard]. Bulletin of the Command and Engineering Institute of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus. N 1(17). P. 104–116. (In Russian).

8. SP 468.1325800.2019. (2019) Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. Pravila obespecheniya ognestojkosti i ognesohrannosti [Concrete and reinforced concrete structures. Rules for ensuring fire resistance and fire safety]. Introduction 2020-06-11. Moscow: Ministry of Construction of Russia. P. 107. (In Russian).

9. Posobie k SNIIP II-2-80 (1985) po opredeleniyu predelov ognestojkosti konstrukcij, predelov rasprostraneniya ognya po konstrukciyam i grupp vozgoraemosti materialov [Manual to SNIIP II-2-80 for determining the fire resistance limits of structures, the limits of fire propagation along structures and the flammability groups of materials]. Moscow: Stroyizdat. P. 55. (In Russian).

10. El-Fitiany S. F., Youssef M. A. (2014). Simplified Method to Analyze Continuous Reinforced Concrete B. *Aci Structural Journal*. Sci. 111(1). P. 145-156.

11. Heo, Y-S., Sanjayan, J., Han, C. G., & Han, M. C. (2011). Construction application of fibre. Mesh method for protecting concrete columns in fire. *Construction and Building Materials*, 25(6), P. 2928 - 2938.

12. Youssef M. A., El-Fitiany S. F., Elfeki M. A. (2008). Flexural Behavior of Protected Concrete Slabs after Fire Exposure. *Designing Concrete Structures for Fire Safety*. P. 47-74.

13. Youssef M. A., Moftah M. (2007). General Stress-Strain Relationship for Concrete at Elevated Temperatures. *Engineering Structures*. 29(10). P. 2618-2634.

14. Willam K. J., Warnke E. P. (1975). Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete // *Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering*. 19. P. 174.

15. Phan LT, Carino NJ. (1998). Review of Mechanical Properties of HSC at Elevated Temperature. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*. 10(1). P. 58-64.

16. Abrams M. S. (1971) Compressive Strength of Concrete at Temperatures to 1600°F. *Temperature and Concrete (Special Publication American Concrete Institute)*. 25. P. 33-59.

17. Hertz K. D. (2005). Concrete strength for fire safety design. *Mag Concrete Res*. 57(8). P. 445-453.

18. Malhotra H. L. (1956). Effect of Temperature on the Compressive Strength of Concrete. *Mag Concrete Res*. 8. P. 85-94.

19. Anderberg Y, Thelandersson S. (1976). Stress and Deformation Characteristics of Concrete at High Temperatures: 2 Experimental Investigation and Material Behaviour Model. *Bulletin 54*. Sweden, Lund: Lund Institute of Technology.

20. Yakovlev A. I. (1988). Raschet ognestojkosti stroitel'nyh konstrukcij [Calculation of fire resistance of building structures]. Moscow: Stroyizdat. P. 143. (In Russian).

21. Belov V. V., Semenov K. V., Renev I. A. (2010). Ognestojkost' zhelezobetonnyh konstrukcij: modeli i metody rascheta [Fire resistance of reinforced concrete structures: models and calculation methods]. *Magazine of civil engineering*. №6. (In Russian).

22. Uchebno-metodicheskoe posobie v pomoshch' specialistam proektnyh i montazhnyh organizacij. Razdel I: Protivopozharnaya zashchita vysotnyh zdaniy i unikal'nyh obektov (2004) [Educational and methodological manual to help specialists of design and installation organizations. Section I: Fire protection of high-rise buildings and unique objects]. Moscow: LLC PKF «Endemik». P. 85. (In Russian).

23. STO 36554501-006-2006. (2006). Pravila po obespecheniyu ognestojkosti i ognesohrannosti zhelezobetonnyh konstrukcij [Rules for ensuring fire resistance and fire safety of reinforced concrete structures]. Introduction 2006-10-20. Moscow: FGUP «NITs Construction». P. 77 (In Russian).

DOI 10.15826/rjst.2022.1.002

УДК 69.04

Борисов Н. С.

ООО «Эффективное проектирование», Екатеринбург, Россия

e-mail: nkt.borisov@mail.ru

РАСЧЕТ ДАВЛЕНИЯ ГРУНТОВ НА ОГРАЖДЕНИЯ

Аннотация. В статье приводится сравнительный анализ существующих методов расчета давления грунтов на ограждения. Оценивается эффективность давно существующих аналитических методов расчета и развивающихся в данное время численных методов на основе метода конечных элементов. Приводятся положительные и отрицательные стороны обоих методов, даются рекомендации по их применению. Основное внимание уделено численным методам, приводятся практические примеры расчета давления грунта на ограждающие конструкции. Оценивается влияние различных факторов на результаты численных расчетов, в том числе влияния сцепления грунтов, влияние жесткости грунта и жесткости ограждающей конструкции. Приводится сравнение практического расчета активного и пассивного давлений аналитическим и численным способом и соответствующие выводы. Некоторое внимание уделено скальным грунтам и их взаимодействию и ограждающей конструкцией.

Ключевые слова: Давление грунтов, геотехническое проектирование, метод конечных элементов, подпорные стены, скальные грунты.

Borisov N. S.

LLC «Effect design», Ekaterinburg, Russia

e-mail: nkt.borisov@mail.ru

CALCULATION OF SOIL PRESSURE ON SHORING OF EXCAVATION

Abstract. The article provides a comparative analysis of existing methods for calculating soil pressure on fences. The effectiveness of long-existing analytical calculation methods and currently developing numerical methods based on the finite element method is evaluated. The positive and negative sides of both methods are given, recommendations for their application are given. The main attention is paid to numerical methods, practical examples of calculating ground pressure on enclosing structures are given. The influence of various factors on the results of numerical calculations is estimated, including the influence of soil cohesion, the influence of soil stiffness and the rigidity of the enclosing structure. A comparison of the practical calculation of active and passive pressures by analytical and numerical methods and the corresponding conclusions are presented. Some attention is paid to rocky soils and their interaction with the enclosing structure.

Keywords: soil pressure, geotechnics, finite element method, retaining walls, rocky soils.

1. Введение

Простейшие аналитические методы расчета давления грунтов на ограждения основываются на теории

предельного равновесия (или предельного напряженного состояния). Данная теория предполагает переход всей рассматриваемой зоны грунта

(призмы обрушения) в предельное напряженное состояние. Это позволяет применять к элементам этой зоны уравнение предельного равновесия, известное как закон Кулона:

$$\tau_{\text{пред}} = \sigma * \tan(\varphi) + c.$$

Также, вводится гипотеза о прямолинейности поверхностей скольжения, что значительно упрощает расчёты. Для расчета давления принимается, что грунт находится в активном предельном состоянии (вертикальное напряжение превышает горизонтальное), для реализации которого необходимо некоторое смещение ограждения по направлению давления грунта, которое обычно происходит вследствие конечной жесткости ограждающих конструкций и податливости грунта. Аналитический расчет подробно описан в работах [1-9].

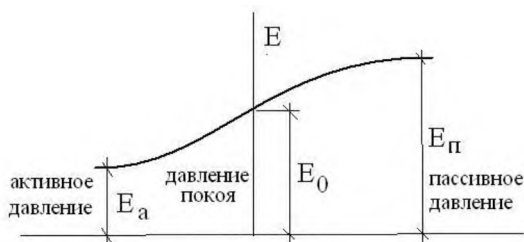


Рис. 1. График зависимости давления от смещения стенки

Активное давление – наименьшее возможное давление, пассивное – наибольшее. Активное давление реализуется при движении стенки от грунта (типичные подпорные стены), а пассивное – при движении сооружения на грунт (устой мостов при наличии распора). Аналитический подход применим в некоторых случаях и оправдывается опытом, но на данном этапе развития геотехники существуют новые более качественные методы оценки давления грунтов на ограждения, оценки устойчивости сооружений и возникающих в элементах сооружений усилий. Эти методы основываются на применении метода конечных элементов и способны

учесть намного большее количество факторов, влияющих на основные результаты расчетов [10-15]. И в конечном итоге избежать аварийных ситуаций [16, 17].

2. Расчеты давления аналитическим и численным способами

Рассмотрим схему ограждения котлована консольного типа.

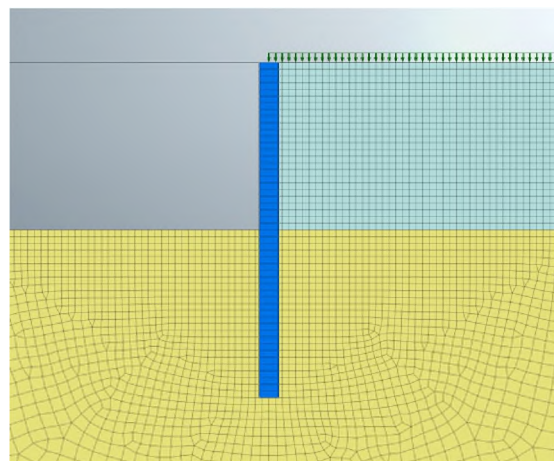


Рис. 2. Расчетная схема для численного расчета

Определим давление на ограждение численным методом в ПК Midas GTS NX и аналитическим методом.

Используем следующие характеристики грунта: $\varphi = 20^\circ$, $c = 10$ кПа, $\gamma = 18 \frac{\text{кН}}{\text{м}^3}$

Коэффициент активного давления с учетом трения грунта о стенку (угол трения грунта о стенку $\varphi_0 = 6,66^\circ$) составил $\lambda = 0,458$. Данное значение использовалось в качестве коэффициента бокового давления при численном расчете: $K_0 = \lambda = 0,458$.

Модель грунта – упругопластическая Modified Mohr-Coulomb.

Трение на контактной поверхности в численной модели учитывалось с помощью введения интерфейсов между грунтом и ограждающей конструкцией. Сцепление интерфейсных элементов принималось равным нулю, чтобы грунт не мог «прилипнуть» к ограждению.

Проанализируем результаты расчета (рис. 3 и 4). Наличие горизонтальных смещений даёт основание полагать, что реализуется активное давление грунта. Красным цветом показаны зоны

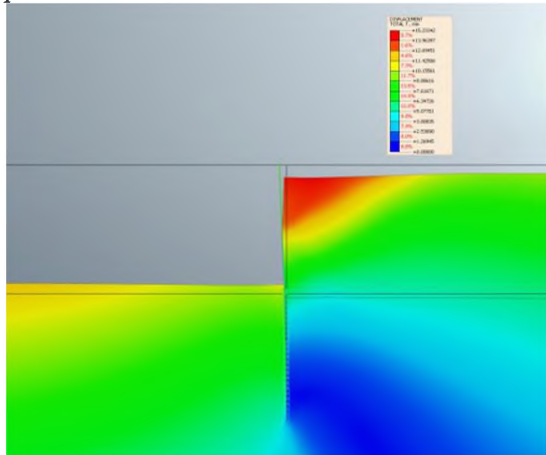


Рис. 3. Изополя общих перемещений

предельного равновесия (пластические точки). Их распространение также говорит о переходе грунта в активное напряженное состояние.

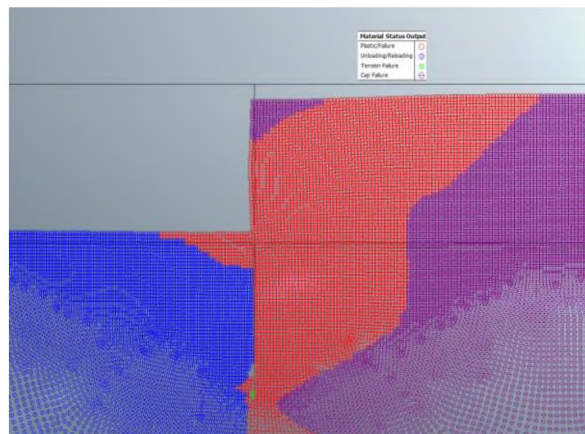


Рис. 4. Распространение зон предельного равновесия



Рис. 5. Эпюры давления на ограждение

В итоге получаем хорошее совпадение численного и аналитического решений: вид графиков примерно одинаковый. Разница лишь в том, что в численном расчете давление начинает расти несколько ниже. Так происходит из-за различного подхода к учету сцепления, при численном решении высота вертикального откоса, который удерживается за счет сцепления, больше, чем аналогичная высота при аналитическом подходе.

Но такая ситуация реализуется не всегда. Большое влияние на эпюру

давления оказывает жесткость ограждения и жесткость грунта (или относительная жесткость грунта относительно ограждения). При большой жесткости ограждения перемещения его становятся меньше, следовательно, активное давление реализуется в меньшей степени и давление на ограждение возрастает (так как давление покоя или тем более пассивное давление значительно превышают активное давление).

Рассмотрим пример грунта с большими жесткостными

характеристиками по сравнению с первым расчетом, а жесткость стойки, наоборот, снизим. В аналитическом плане в этом случае ничего не изменится, так как деформации грунта в теории предельного равновесия не определяются и жесткость не учитывается.

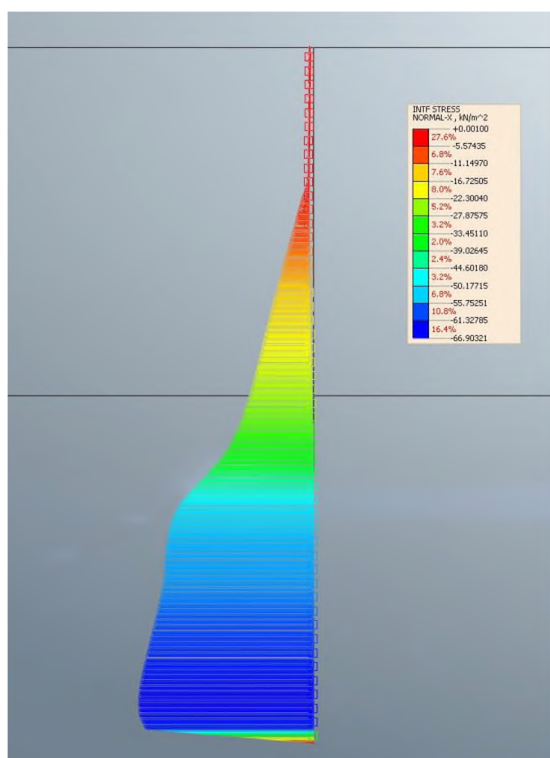


Рис. 6. Эпюра давления на ограждение по МКЭ

Видно, что эпюра имеет уже не треугольный вид. Поменялись также значения перемещений и области предельного равновесия. В случаях, когда ограждение имеет дополнительные конструкции крепления – анкеры, распорки и т.п., расхождение между численными и аналитическими подходами увеличивается. В случае массивных подпорных стен сложных очертаний, например уголковых, эпюры давлений также различаются достаточно сильно. На рисунке 7 представлены эпюры давлений на уголковую подпорную стену при численном решении и типичный вид эпюры по аналитическому решению.

В случае численных расчетов давлений следует уделять пристальное внимание учёту сцепления грунта. В комплексных геотехнических программах сцепление понимается как следствие некоторого переуплотнения грунта. Даже незначительная величина сцепления у грунта приводит к отсутствию давления у верха ограждения на значительную глубину.

Рассмотрим теперь практический случай расчета давления грунта на ограждение, закрепленное в скальном грунте и имеющее анкерное крепление (рис. 8).

В данном случае ИГЭ 5 и ИГЭ 6 являются скальными грунтами (оранжевый и зеленый цвет соответственно). Результаты стадийного расчета разработки котлована представлены на рисунках 9-13.

По рисункам 12 и 13 видна хорошая сходимость ручного и численного расчетов. Видно, что давление грунта есть только в пределах распространения дисперсных грунтов. Скальные грунты не оказывают давления вследствие наличия у них значительного сцепления. Однако следует учитывать, что стойки ограждения котлована погружаются в заранее пробуренные скважины и в дальнейшем эти скважины заполняются либо бетоном, либо щебнем, из-за чего какое-то давление все равно будет оказываться. Также, в случае значительной нагрузки на поверхности, давление сможет передаваться и через скальный грунт. Не стоит также полагать, что скальные грунты никогда не оказывают давления на ограждения. Наличие или отсутствие давления зависит от прочности и трещиноватости скального массива. В процессе бурения скважин может разрушиться структура массива скального грунта, что сопряжено с разрушением структурных цементационных невосстанавливаемых связей. В этом случае может иметь место сдвиг частей

скального массива относительно других частей по трещинам, тогда давление на ограждение будет значительно. Для принятия решения необходимы исследования скальных грунтов как в лаборатории, так и в полевых условиях для изучения трещиноватости массива.

Рабочая зона (зона, где возникают напряжения) распространяется на глубину 0,4 м. В реальности эта глубина зависит от свойств грунта и качества заделки. Пассивное давление по численным и аналитическим расчетам отличаются достаточно сильно. В ряде программ, производящих расчеты аналитическими способами, пассивное давление сильно преувеличивается. Такое преувеличение приводит к большой разнице между равнодействующими активного и пассивного давлений, а это в свою очередь приводит к скачку на эпюре поперечных сил и увеличению сечения ограждения, хотя в реальности такого скачка, конечно, не наблюдается. При расположении стоек ограждения с шагом, отличающимся от 1 м, значение

давления на ограждение в аналитических методах получается простым умножением полученных для 1 м значений на шаг стоек. В реальности же некоторая часть давления будет передаваться на массив грунта и увеличивать напряжения в нём. Какая именно часть будет передаваться зависит от многих факторов, в первую очередь - от соотношения жесткостей грунта и ограждения. Простое умножение может быть применено в случае абсолютно жесткой заделки, которая не может перемещаться. Но в реальности ограждение всегда будет перемещаться и деформироваться, что приведет к перераспределению напряжений и изменению общего НДС системы. Учет данного фактора сильно сказывается на эпюрах усилий в ограждении и в конечном счете на экономичности проектного решения. Учесть сложное изменение давления в следствие перераспределения напряжений между грунтом и массивом грунта представляется возможным только численными методами.

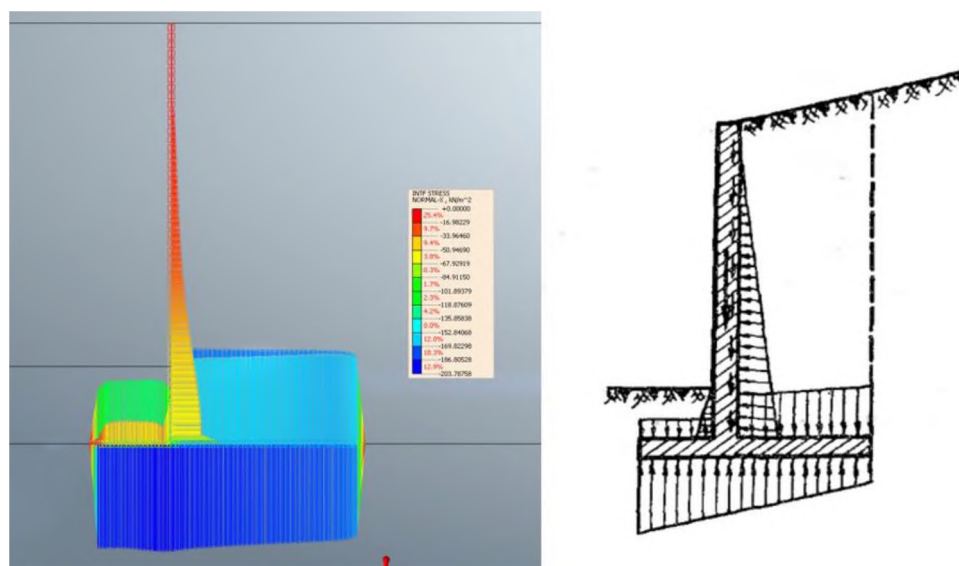


Рис. 7. Эпюры давления грунта на угловую подпорную стенку: слева – модель в ANSYS; справа – теоретическая схема

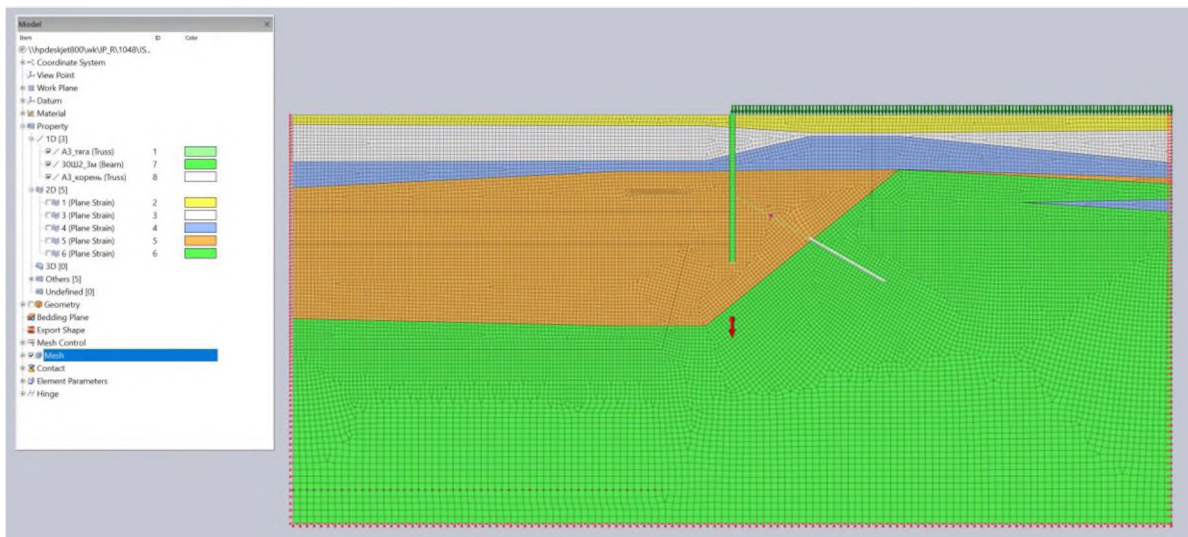


Рис. 8. Расчетная схема

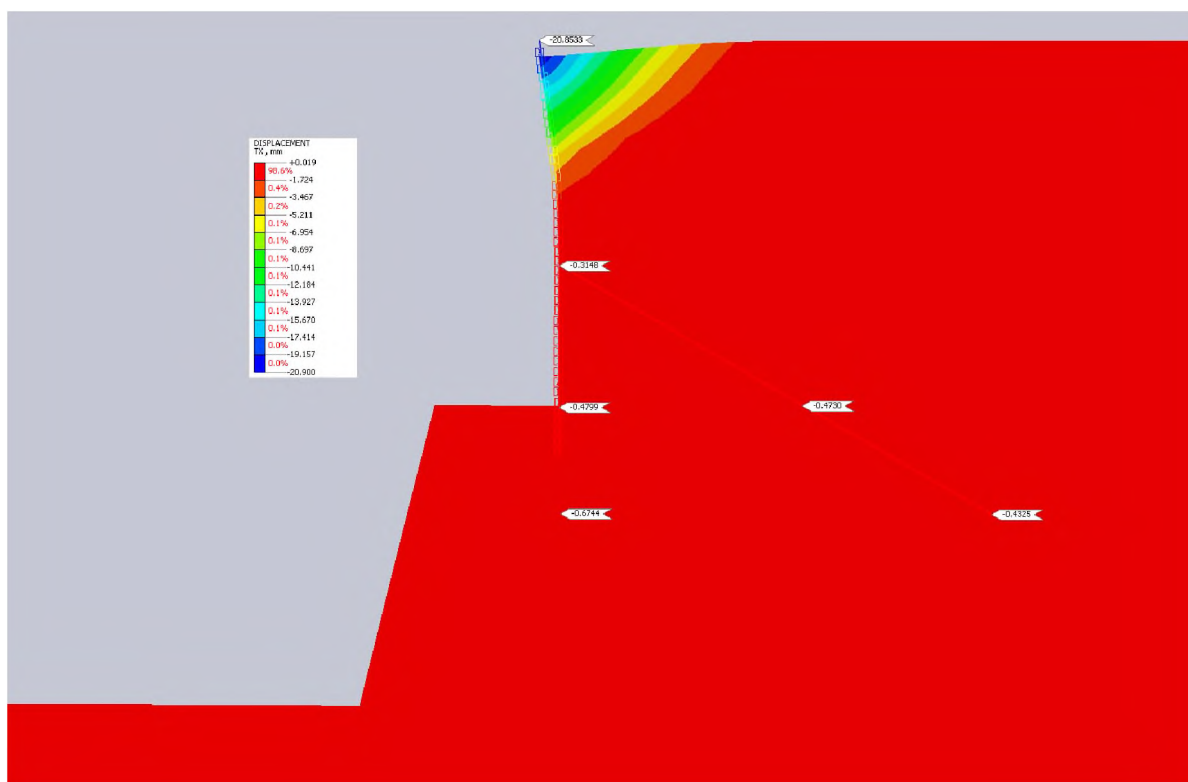


Рис. 9. Изополя горизонтальных перемещений на последней стадии разработки котлована

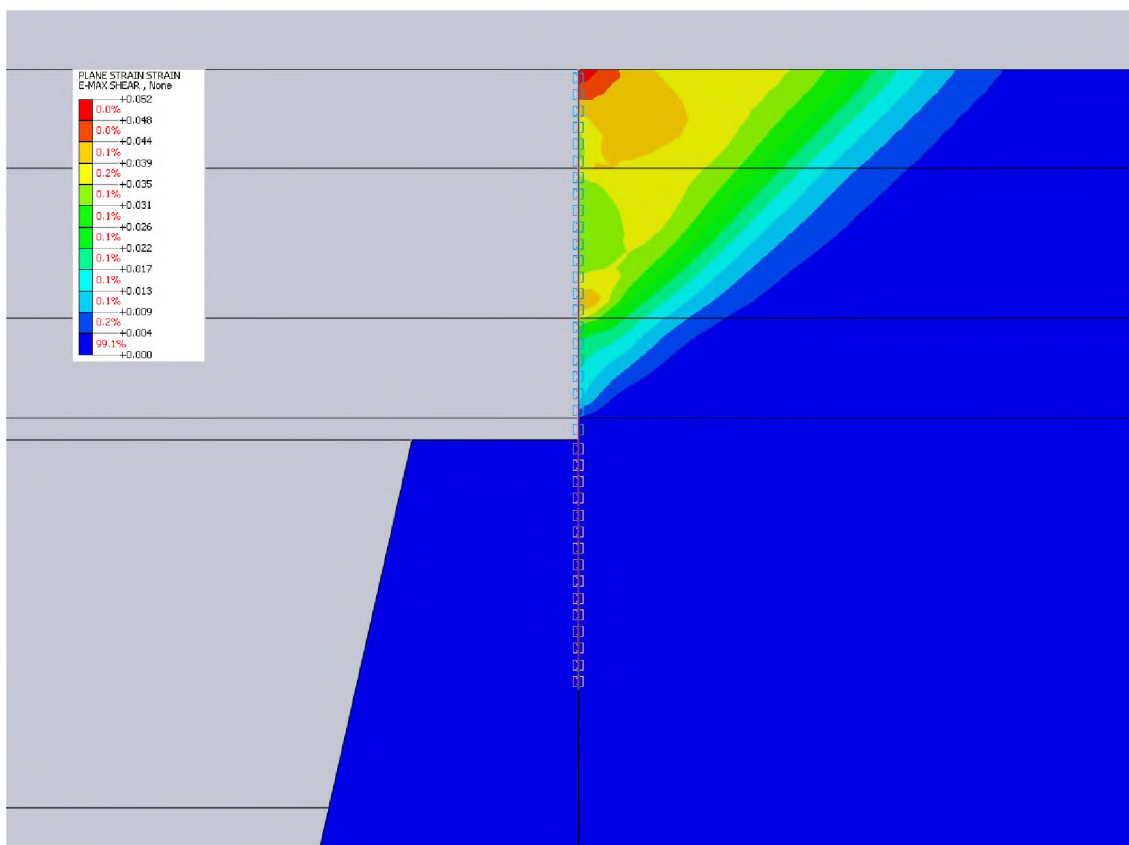


Рис. 10. Сдвиговые деформации в системе

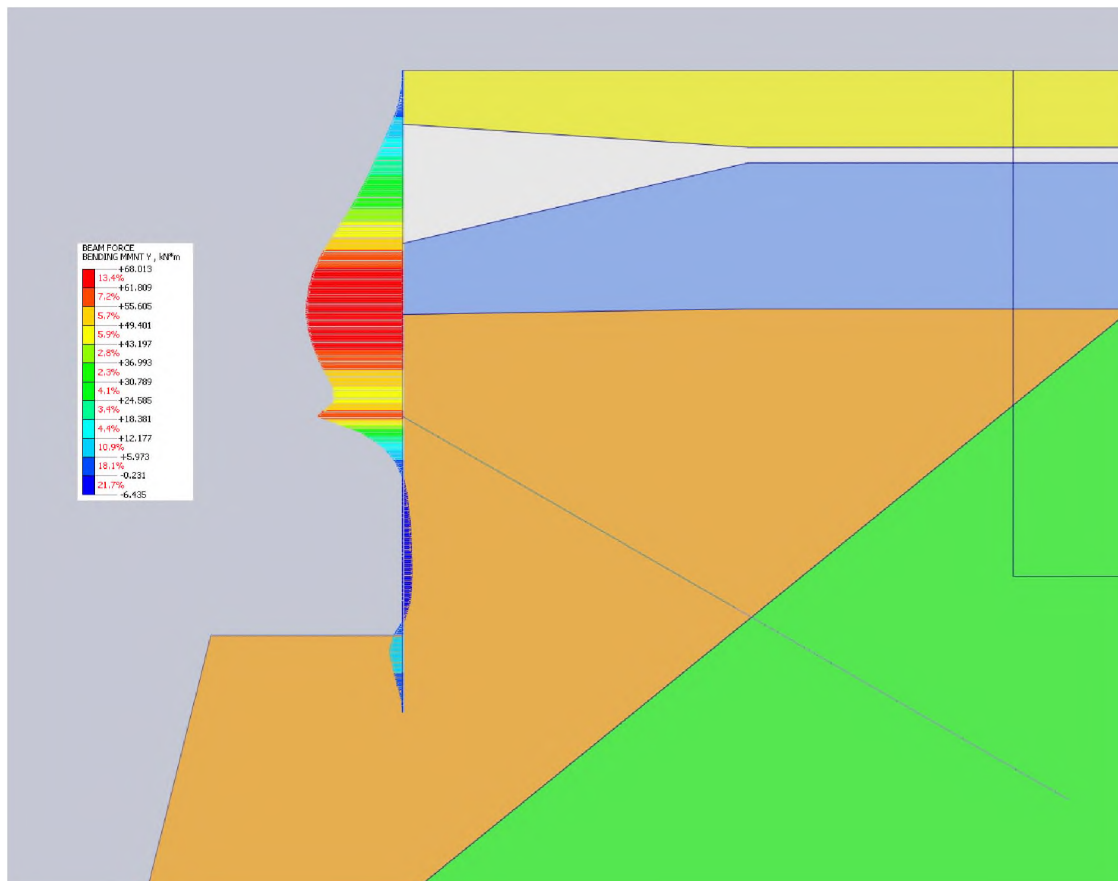


Рис. 11. Эпюра изгибающих моментов в ограждении котлована

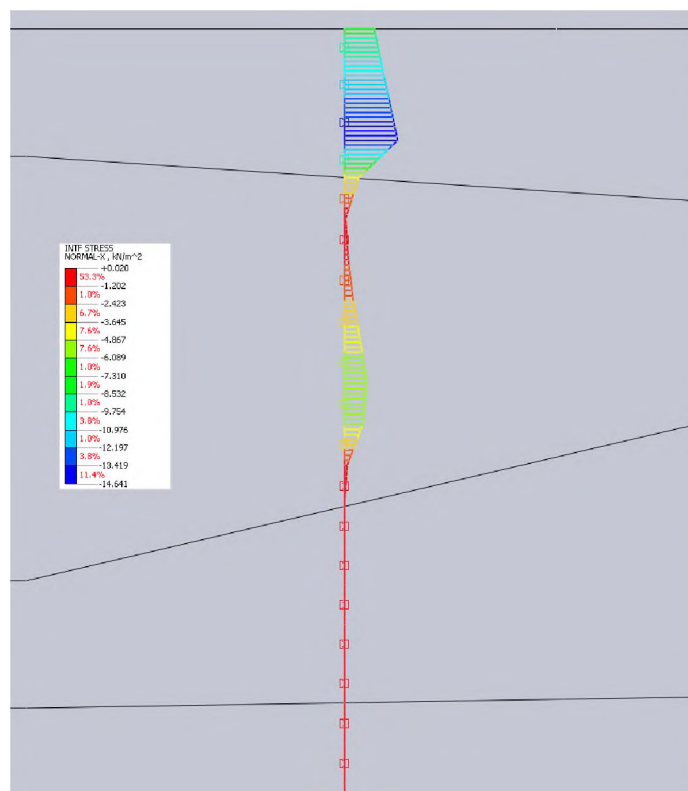


Рис. 12. Давление грунта на ограждение по численному расчету

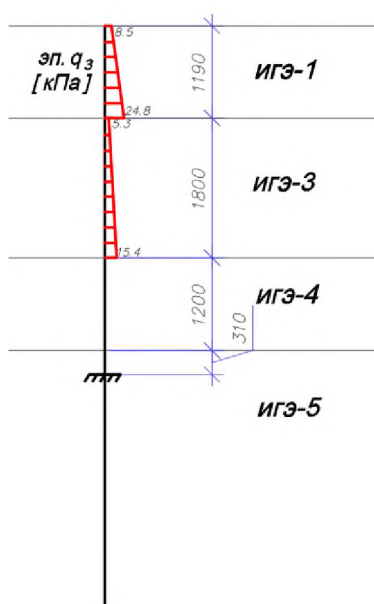


Рис. 13. Давление грунта на ограждение по аналитическому расчету

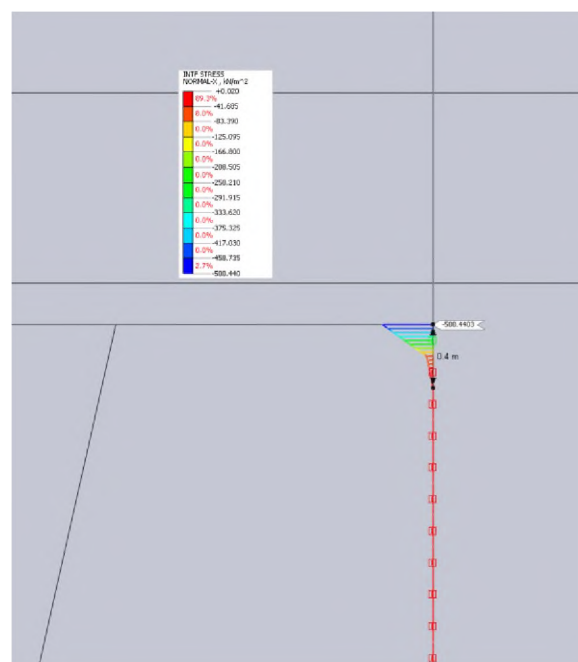


Рис. 14. Давление грунта слева от стенки на ограждение

3. Выводы

Метод конечных элементов позволяет определять давление грунтов на ограждения, учитывая при этом множество факторов. Переход к

активному либо пассивному состоянию грунта происходит автоматически, в зависимости от напряженного состояния в данной точке массива. Помимо этого, численные методы имеют ещё ряд преимуществ, таких как:

возможность учета сложной геологической обстановки, различных способов крепления стен, сложных нагрузений, последовательности производства работ и других факторов. Для качественного представления о давлении и для проверки численных решений всегда можно и нужно использовать аналитические методы с последующим анализом и сопоставлением.

Список используемых источников

1. Клейн Г. К. Расчет подпорных стен. Ярославль: Высшая школа, 1964.
2. Иванов П. Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. Москва: Высшая школа, 1985
3. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения. М.: АСВ, 2014. 728 с
4. Прагер В. Введение в механику сплошной среды / В. Прагер. – М.: Издательство иностранной литературы. 1963. – 312с.
5. Герсеванов Н.М. Основы динамики грунтовой массы / Н.М. Герсеванов. – М.: ОНТИ, 1937. – 241с.
6. Клейн Г. К. Строительная механика сыпучих тел. М.: Госстройиздат, 1956. 252 с
7. Poncelet J. Memoire sur la stabilite de revetemens et de leurs, foundations // Memorial de l'officier du genie. P., 1840. Vol. 13.
8. Duncan, J.M. and Chang, C.Y. (1970). "Nonlinear analysis of stress and strain in soils." Journal of Soil Mech. and Foundation Division, ASCE, pp. 1629-1653.
9. Culmann C. Die graphische Statik. Zürich, 1866.
10. Vermeer P. Column Vermeer // Plaxis Bulletin. 1999. № 7. URL: plaxis.com/content/uploads/2016/10/Plaxis-Bulletin-07.pdf.
11. Vermeer P. Column Vermeer // Plaxis Bulletin. 1999. № 8. URL: plaxis.com/content/uploads/2016/10/Plaxis-Bulletin-08.pdf.
12. Шашкин В.А. Решение задач предельного равновесия с использованием метода конечных элементов / В.А. Шашкин, К.Г. Шашкин, М.В. Дунаева // Развитие городов и геотехническое строительство. – 2001. - №13. –С.61-95.
13. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике / О.К. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 542с.
14. Brinkgrvee, R.B.J., Shen, R.F. (2011). Structural Elements & Modelling Excavations in

Plaxis, Power Point Presentation File, Delf, the Netherlands

15. Potts, D.M, and Zdravkovic L. (1999). Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering., Thomas Telford, London.

16. Richard Magus. (2005). Report of the Committee of Inquiry into the incident at the MRT Circle Line Worksite that led to the Collapse of the Nicoll Highway on 20 April 2004, Singapore

17. Gouw, Tjie-Liong. (2012). "Deep Excavation Failures, Can They Be Prvented." Proc. International Symposium on Sustainable Geosynthetics and Green Technology for Climate Change, SGCC2011, Retirement Symposium for Prof. Dennes T. Bergado, 20 - 21 June 2012, Bangkok, Thailand., pp. 259-27

References

1. Klein G. K. Raschet podpornih sten [calculation of retaining walls]. Yaroslavl: Vishaya shkola, 1964. (In Russian).
2. Ivanov P. L. Grynti I osnovaniya gidrotehnicheskikh sooryzheniy [Soils and foundations of hydraulic structures]. Moscow: Vishaya shkola, 1985. (In Russian).
3. Spravochnik geotekhnika. Osnovaniya, fundamenti i podzemniye sooryzheniya [Geotechnics Reference Book. Foundations, foundations and underground structures] Moscow.: ACB, 2014. 728 s. (In Russian).
4. Klein G. K. Stroitel'naya mehanika sypuchih tel [Construction mechanics of bulk solids]. Moscow.: Gosstroyizdat, 1956. 252 s. (In Russian).
4. Preger, V. Vvedenie v mehaniku sploshnoy sredi [Introduction to Continuum Mechanics / V.Preger. – Moscow.:Izdatelstvo inostrannoy literaturi. 1963. – 312s. (In Russian).
5. Gersevanov, N.M. Osnovy dinamiki gryntovoy massi [Fundamentals of soil mass dynamics] / N.M. Gersevanov. – Moscow.: ONTI, 1937. – 241s. (In Russian).
6. Klein G. K. Stroitel'naya mehanika sipuchih tel. Moscow: Gosstroyizdat, 1956. 252 s
7. Poncelet J. Memoire sur la stabilite de revetemens et de leurs, foundations // Memorial de l'officier du genie. P., 1840. Vol. 13.
8. Duncan, J.M. and Chang, C.Y. (1970). "Nonlinear analysis of stress and strain in soils." Journal of Soil Mech. and Foundation Division, ASCE, pp. 1629-1653.
9. Culmann C. Die graphische Statik. Zürich, 1866.
10. Vermeer P. Column Vermeer // Plaxis Bulletin. 1999. № 7. URL: plaxis.com/content/uploads/2016/10/Plaxis-Bulletin-07.pdf.
11. Vermeer P. Column Vermeer // Plaxis Bulletin. 1999. № 8. URL:

plaxis.com/content/uploads/2016/10/Plaxis-Bulletin-08.pdf.

12. Shashkin, V.A. Recheniye zadach predelnogo ravnovesiya s ispolzovaniem metoda konechnykh elementov [Solution of limit equilibrium problems using the finite element method] / V.A. Shashkin, K.G. Shashkin, M.V.Dunaeva // Razvitie gorodov i gidrotehnicheskoe stroitelstvo. – 2001. - №13. – С.61-95. (In Russian).

13. Zenkevich, O.K. Metod konechnykh elementov v tehnikе [The finite element method in engineering]/ O.K. Zenkevich. – Moscow.:Mir, 1975. – 542s. (In Russian).

14. Brinkgreve, R.B.J., Shen, R.F. (2011). Structural Elements & Modelling Excavations in

Plaxis, Power Point Presentation File, Delf, the Netherlands

15. Potts, D.M, and Zdravkovic L. (1999). Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering., Thomas Telford, London.

16. Richard Magus. (2005). Report of the Committee of Inquiry into the incident at the MRT Circle Line Worksite that led to the Collapse of the Nicoll Highway on 20 April 2004, Singapore

17. Gouw, Tjie-Liong. (2012).“Deep Excavation Failures, Can They Be Prvented.” Proc. International Symposium on Sustainable Geosynthetics and Green Technology for Climate Change, SGCC2011, Retirement Symposium for Prof. Dennes T. Bergado, 20 - 21 June 2012, Bangkok, Thailand., pp. 259-27

DOI 10.15826/rjst.2022.1.003

УДК 624.072.232

*Almuslehi O. F.*¹, *Fomin N. I.*², *Rutkauskas T. K.*³

^{1,2,3} Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

E-mail: ¹ of35257@gmail.com, ² nnimoff@mail.ru, ³ tatiana.k.rut@yandex.ru

STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE BEAMS IN A DAMAGED BUILDING USING CARBON FIBER MATERIALS

Abstract. This article discusses modern methods for calculating various methods for checking the bearing capacity of a beam after its strengthening in a multi-story commercial building (on the example of the Al-Salam Commercial complex), located at the address: Iraq, Ramadi, St. Alcinama. The building was damaged by the war, necessitating a study to determine the best and most cost-effective way to strengthen concrete beams using carbon fiber composite materials as the external strengthening. Based on the data obtained as a result of the strength assessment, recommendations were given on the method of strengthening reinforced concrete beams.

Keywords: strengthening, beam, reinforced concrete, shear, carbon fiber, strength, bending, polymer composite, rod

*Альмуслехи О. Ф.*¹, *Фомин Н. И.*², *Руткаускас Т. К.*³

^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.

Ельцина, Екатеринбург, Россия

E-mail: ¹ of35257@gmail.com, ² nnimoff@mail.ru, ³ tatiana.k.rut@yandex.ru

УСИЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК В ПОВРЕЖДЕННОМ ЗДАНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. В данной статье рассмотрены современные методы расчетов различных способов проверки несущей способности балки после ее усиления в многоэтажном коммерческом здании (на примере торгового комплекса Аль-Салам), расположенном по адресу: Ирак, город Рамади, ул. Альсинома. Здание было повреждено в результате военных действий, что потребовало проведения исследования по определению наилучшего и наиболее экономичного способа усиления железобетонных балок с использованием композитных материалов на основе углеродного волокна в качестве системы внешнего армирования. На основании полученных данных в результате оценки на прочность были даны рекомендации по способу усиления железобетонных балок.

Ключевые слова: усиление, балка, железобетон, сдвиг, углеродное волокно, прочность, изгиб, полимерный композит, стержень

1. Introduction

Strengthening the structural elements of buildings is an important issue for building maintenance and sustainability [1, 2]. Strengthening the structural members of the building to increase its bearing capacity in the event of the need to increase the design loads or in the event of

the building being damaged as a result of external factors. Correct and timely strengthening of building structures can significantly lower costs, increase their useful lives, or prevent accidents and collapses [3, 4].

There are several ways to strengthen the structural elements, including old ones,

such as reinforcement using iron structures or steel sheets, as well as modern methods such as using fiber-reinforced polymer (FRP) and carbon fiber bars [5].

One of the disadvantages of using epoxy-bonded external steel panels and building steel jackets is that it increases the self-weight of the building in addition to an increase in the dimensions of the structural elements in addition to distorting the architectural dimensions [6]. However, it is effective in terms of strength, hardness, and ductility [7]. The advantages of reinforcing structural elements using carbon-fiber panels are that they are light in weight, have high resistance to aggressive environments, are not limited in dimensions, have high strength, ease of implementation, do not require equipment, are very good in execution, do not require a long time to implement. Even though the reinforcement with carbon fiber panels is considered expensive if we compare it with traditional methods, it is sometimes economically feasible as it is possible to work in the building without the need to turn it off, and the work does not need a lot of workers, and it is possible to increase the stress by increasing the width of the carbon fiber panels or increase the number of layers [8,9].

Through studies, it has been shown that cracking can occur after strengthening by separation of the external composite reinforcement from the concrete's surface as well as the separation of the protective layer of concrete from the external reinforcement running along the steel bar [10].

Carbon fiber strengthening is the most flexible and increases the rigidity of the structure [1, 11]. It has high physical and mechanical properties that exceed those of steel [12].

The use of the technology of carbon fiber rods installed near the surface is a good technique for strengthening structural

elements, especially in areas of negative torque [13]. This technique is more effective in areas where the strengthening is subject to mechanical and environmental damage. Where a groove is made in the desired direction and filled with a special epoxy, carbon fiber rods are installed inside the groove, and the epoxy is settled with the outer surface of the concrete.

2. Problem Research

2.1. Characteristics of the place of practice

An eight-story building of a shopping center, as shown in Fig. 1, it is called (Al Salam Commercial Complex), which was damaged by the war in 2015, was chosen to study the reinforcement of reinforced concrete beams. The building is located in Anbar Governorate, Ramadi city, on Main Street and Cinema Street. The building was damaged, as shown in Fig. 2. The company supervising the restoration of the building was contacted and through them, the architectural and construction plans were obtained, as well as the results of laboratory tests carried out to assess the condition of the concrete parts of the building.

2.2. Material properties and reinforcement details of the concrete beams

We conducted a study on the beam specified in Fig. 3, with a length of 6.95 m and dimensions of 600 * 400 mm, the lower reinforcement (2Ø25+3Ø20), the upper reinforcement (2Ø25), and stirrups (Ø10/200mm) as in Fig. 4.

The laboratory tests obtained from the company supervising the strengthening of the beams in the building, where the hammer test and ultrasound of the above beam, where was the compressive strength of concrete 31,3 MPa.

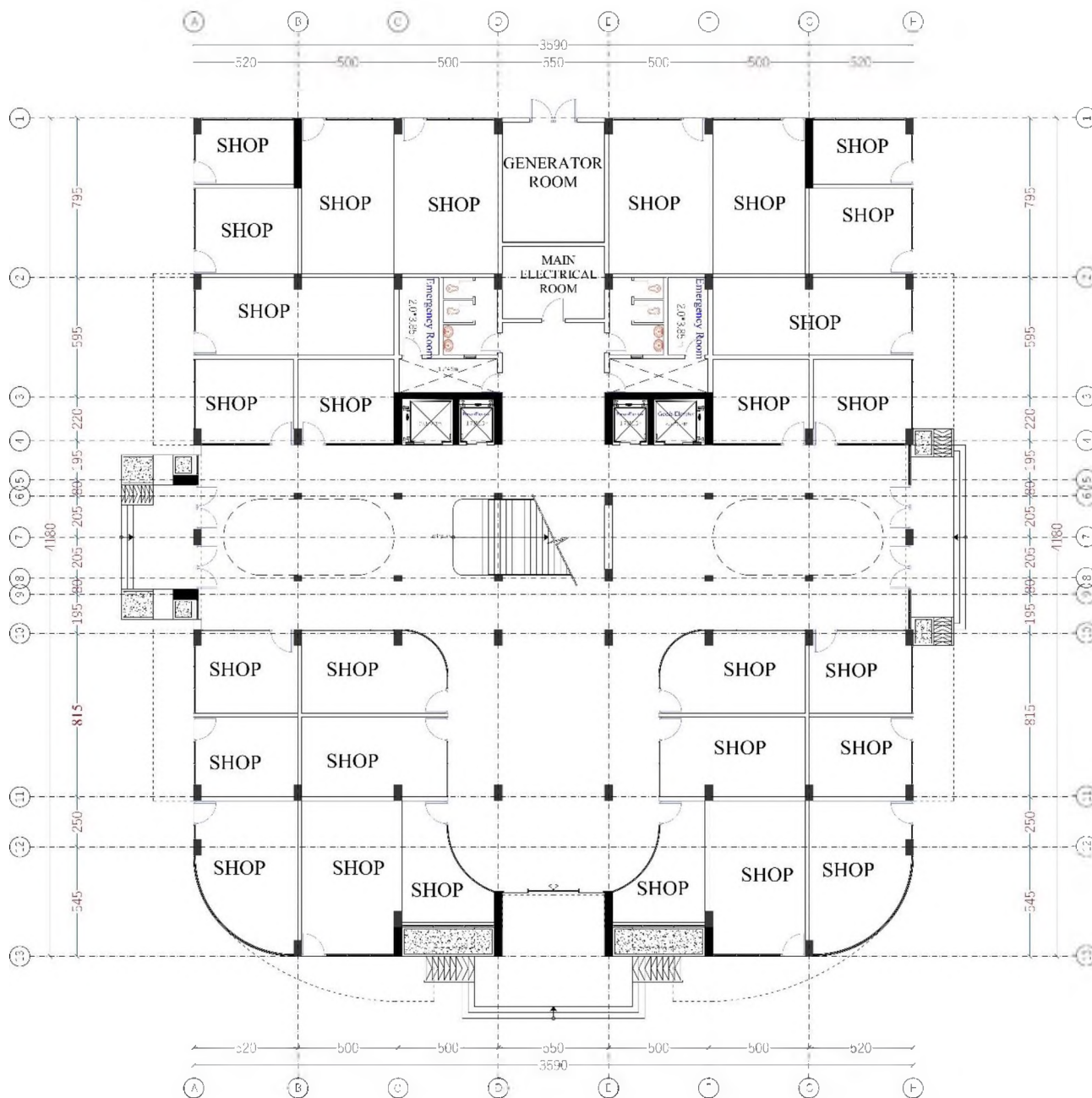


Fig. 1. First floor plan for commercial complex



Fig. 2. The southeast facade of the commercial complex

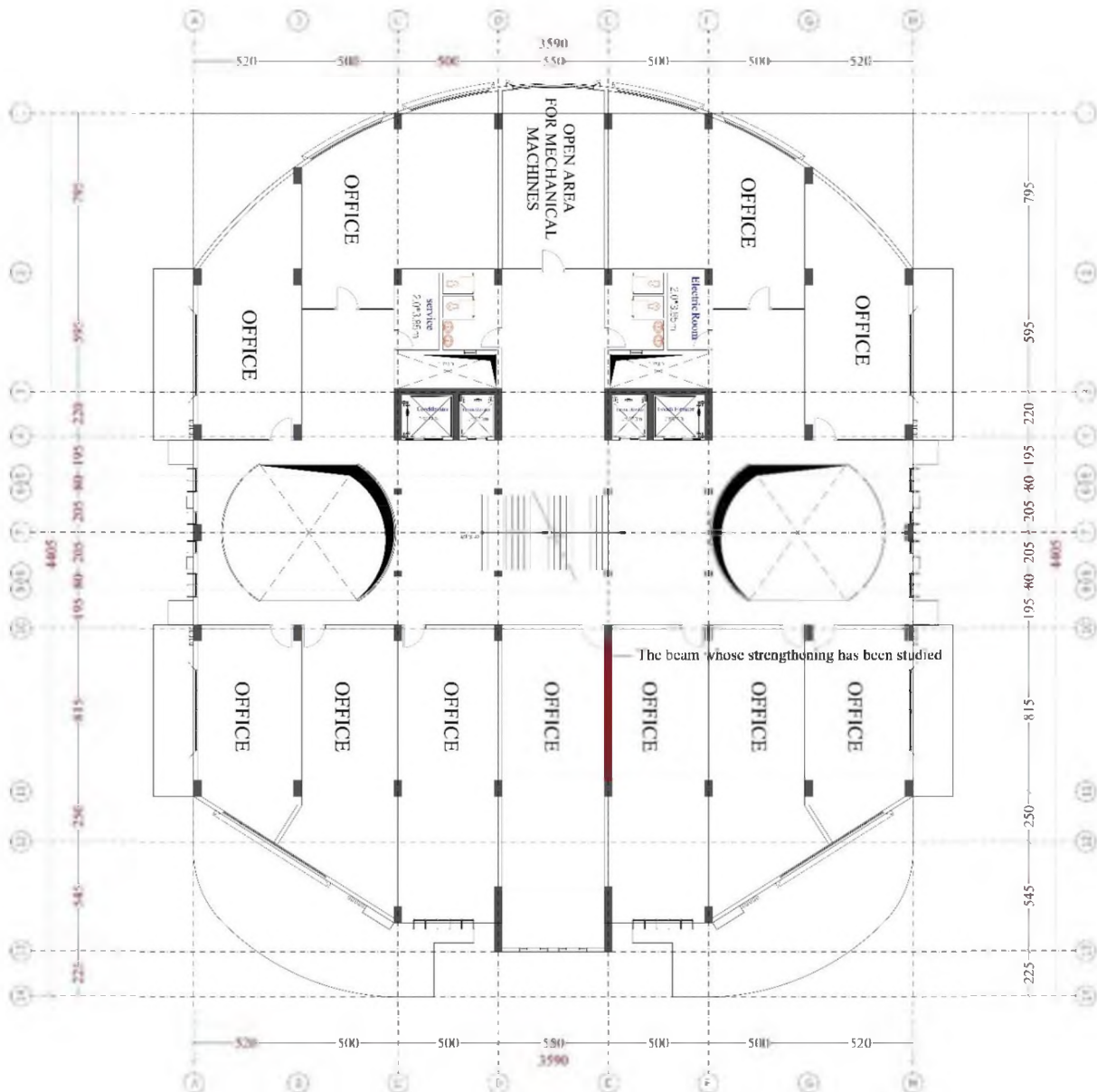


Fig. 3. Plan for the sixth floor Indicates the location of the beam to be studied

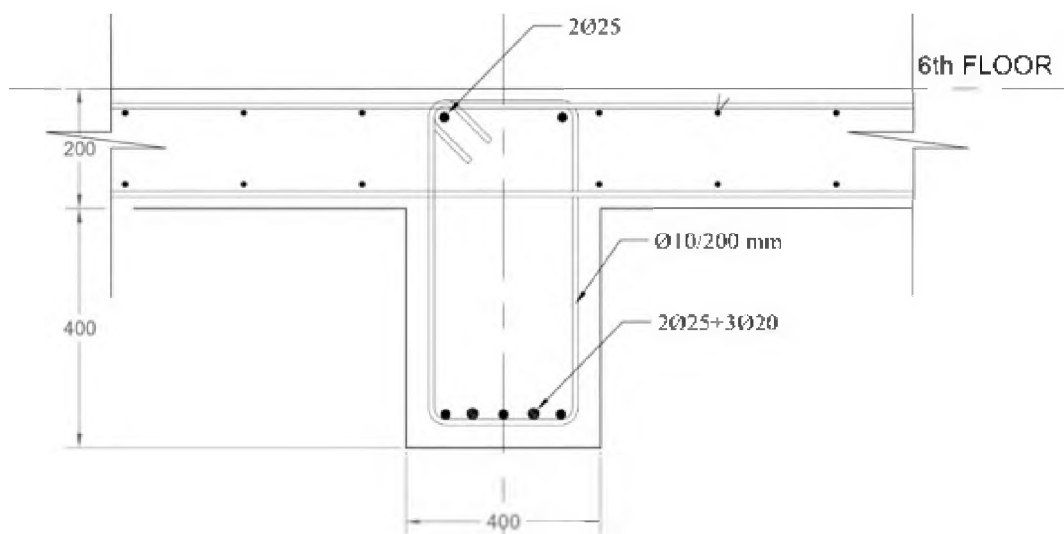


Fig. 4. The section of the beam

2.3. Materials used to strengthen the beam

Carbon fiber plates of the type (Sika® CarboDur® S512) were used, which are pultruded carbon fiber reinforced polymer (CFRP) laminates. According to the properties of material shown in Table 1 [14].

Carbon fiber fabric of the type (SikaWrap®-530C) was used, is a carbon fiber fabric made of unidirectional weaving that is used for wet application. According to the properties of material shown in Table 2 [15].

Carbon fiber fabric of the type (SikaWrap®-301C) was used, is a unidirectional woven carbon fiber fabric for the wet application process. According

to the properties of material shown in Table 3 [16].

Carbon fiber bars of the type (Sika® CarboDur® 1/2" rod) were used, and Pultruded carbon fiber reinforced polymer (CFRP) rods are used to reinforce concrete. By placing the rods into grooves carved out of the beam and bonding them with epoxy resin, the Near Surface Mounted (NSM) technique is usually used to attach the rods. According to the properties of material shown in Table 4 [17].

Linking material of type (Sikadur®-330) is a two-part, solvent-free, thixotropic epoxy-based impregnating resin/adhesive. According to the properties of material shown in Table 5 [18].

Table 1

Mechanical and physical Properties of Carbon fiber type Sika® CarboDur® S512

Characteristics name	Units of measurement	Value
Width	mm	50
Thickness	mm	1,2
Strength of Tensile	MPa	3100
Modulus of Elasticity in Tension	MPa	160000
Elongation during Tensile Break	%	1,7

Table 2

Mechanical and physical Properties of Carbon fiber type SikaWrap®-530 C

Characteristics name	Units of measurement	Value
Width	mm	400
Thickness	mm	0,29
Strength of Tensile	MPa	4900
Modulus of Elasticity in Tension	MPa	230000
Elongation during Tensile Break	%	1,7

Table 3

Mechanical and physical Properties of Carbon fiber type SikaWrap®-301 C

Characteristics name	Units of measurement	Value
Width	mm	500
Thickness	mm	0,29
Strength of Tensile	MPa	4900
Modulus of Elasticity in Tension	MPa	230000
Elongation during Tensile Break	%	1,7

Table 4
Mechanical and physical Properties of Carbon fiber type Sika® CarboDur® 1/2" rod

Characteristics name	Units of measurement	Value
Diameter of rod	mm	12
Strength of Tensile	MPa	3100
Modulus of Elasticity in Tension	MPa	142000
Elongation during Tensile Break	%	0,8

Table 5
Mechanical and physical Properties of Carbon fiber type Sika® CarboDur® 1/2" rod

Characteristics name	Units of measurement	Value
Modulus of Elasticity in Flexure	MPa	3800
Strength of Tensile	MPa	30
Modulus of Elasticity in Tension	MPa	4500
Elongation during Tensile Break	%	0,9(7 days at +23°C)

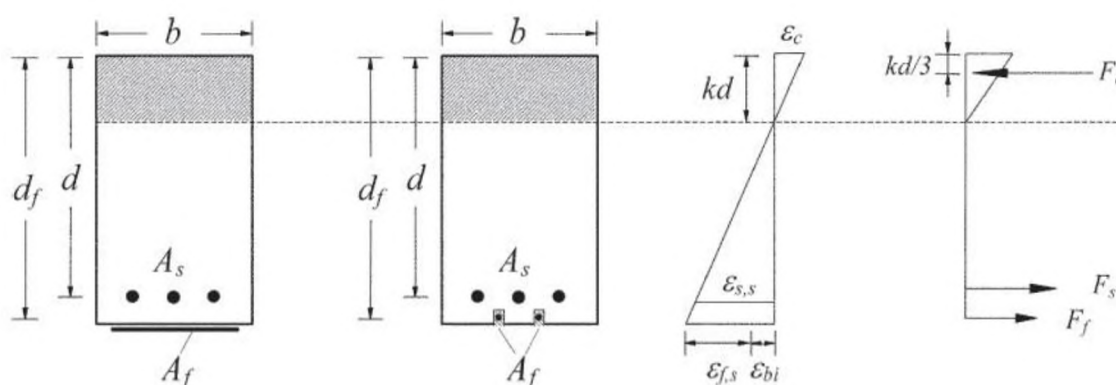


Fig. 5. Strain distribution and force equilibrium conditions for strengthened beams

Modulus of Elasticity in Flexure 3800 MPa, Tensile Strength 30 MPa, Modulus of Elasticity in Tension 4500 MPa and Elongation at Break 0,9 % (7 days at +23°C).

3. Calculation methods and results

3.1. Bending Strengthening

ACI 440.2R-02,08 states that strain compatibility, internal force equilibrium, and governing modes of failure are used to calculate the bending moment of externally bonded FRP beams. For externally strengthened FRP beams, Fig. 5 depicts the strain distribution and force equilibrium conditions [19]. Given that the building is exposed to various environmental conditions for long periods, the properties

of the materials used in the strengthening can be reduced by equations (1, 2).

Therefore, the final tensile strength and the design rupture strain must be determined in the design using the environmental reduction factor, according to the type of fiber and the exposure conditions:

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (1)$$

$$\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^* \quad (2)$$

when f_{fu} – design ultimate tensile strength of FRP, MPa;

f_{fu}^* – ultimate tensile strength of the FRP material as reported by the manufacturer, MPa;

C_E – environmental reduction factor;

ε_{fu} – design rupture strain of FRP reinforcement, mm/mm;

ε_{fu}^* – ultimate rupture strain of FRP reinforcement, mm/mm.

The effective strain in FRP reinforcement should be restricted to the strain at which debonding may occur, ε_{fd} , as indicated in equation 3, to prevent intermediate crack-induced debonding failure mode.

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f_c}{nE_f t_f}} \leq 0.9\varepsilon_{fu}, \quad (3)$$

when ε_{fd} – debonding strain of externally bonded FRP reinforcement, mm/mm;

f_c – specified compressive strength of concrete, MPa;

n – number of plies of FRP reinforcement;

E_f – tensile modulus of elasticity of FRP, MPa;

t_f – nominal thickness of one ply of FRP reinforcement, mm.

Equation 4 can be used to determine the effective strain in the FRP

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL}(h - kd)}{I_{cr}E_c}, \quad (5)$$

$$k = \sqrt{\left(\rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c}\right)^2 + 2\left(\rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c} \left(\frac{h}{d}\right)\right) - \left(\rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c}\right)}, \quad (6)$$

when h – overall thickness or height of a member, mm;

k – ratio of depth of neutral axis to reinforcement Depth measured from extreme compression fiber;

I_{cr} – moment of inertia of cracked section transformed to concrete, mm⁴;

E_c – concrete's elasticity modulus, MPa;

E_s – steel's elasticity modulus, MPa;

E_f – elastic tensile modulus of FRP, MPa.

If the FRP behaves exactly elastically, the material's strain, as determined by equation 7, can be used to compute this effective stress.

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}, \quad (7)$$

when f_{fe} – Stress in the FRP that is effective; stress reached during section failure, MPa.

reinforcement at the ultimate limit condition.

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d_f - c}{c}\right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd}, \quad (4)$$

when ε_{fe} – effective strain in FRP reinforcement attained at failure, mm/mm;

ε_{cu} – the ultimate axial compressive strain of confined concrete corresponding to 0.85 f_c' ultimate axial compressive strain of confined concrete corresponding to failure in a severely confined member, or failure in a lightly confined member (member confined to recover its concrete design compressive strength);

d_f – effective depth of FRP flexural reinforcement, mm;

c – distance from extreme compression fiber to the neutral axis, mm;

ε_{bi} – strain in the concrete substrate at the time of FRP installation (tension is positive), mm/mm.

Where the following formulas can be used to calculate the values of ε_{bi} and k by equations (5, 6):

Using strain compatibility, equation 8 can be used to determine the strain in the nonprestressed steel reinforcement based on the strain in the FRP reinforcement.

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} - \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d - c}{d_f - c}\right), \quad (8)$$

when ε_s – strain in nonprestressed steel reinforcement, mm/mm.

Using the steel's presumed elastic-perfectly plastic stress-strain curve, the stress in the steel is calculated from the strain in the steel by equation 9.

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y, \quad (9)$$

when f_s – stress in nonprestressed steel reinforcement, MPa;

f_y – specified yield strength of nonprestressed steel reinforcement, MPa.

Equation 10 can be used to test internal force equilibrium once the stress in the FRP and steel reinforcement has been established for the presumptive neutral axis depth.

$$\alpha_1 f_c \beta_1 b c = A_s f_s + A_f f_{fe}, \quad (10)$$

when α_1 – multiplier on f_c' to determine intensity of an equivalent rectangular stress distribution for concrete;

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi f A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right). \quad (11)$$

3.2. Shear Strengthening

Shear reinforcement for concrete beams is performed as in Fig. 6 [20]. Where the external strengthening of the concrete beam in the compression zone. It can be in the form of laminates or fabrics extending bonded to epoxy, as in Fig. (6. a). Or the epoxy-bonded fabrics are wrapped around the concrete beam as shown in Fig. (6. b).

When studying the shear strength of concrete beam strengthened with an FRP system, the design shear strength must be greater than the required shear strength. According to ACI 318-05, the nominal shear strength should be multiplied by the

β_1 – ratio of depth of equivalent rectangular stress block to depth of the neutral axis.

The section with FRP external reinforcement nominal flexural strength is calculated using equation 11. The contribution of the FRP reinforcement to flexural strength is adjusted by an extra FRP reduction factor, ψf . The suggested amount for ψf is 0,85.

strength reduction factor ϕ to determine the design shear strength [21].

By adding the FRP's shear resistance contribution (V_f) that we can find in equation 13 to the steel stirrup contribution (V_s) and the concrete shear resistance (V_c), it is possible to calculate the nominal shear strength of a concrete beam reinforced with FRP by equation 12 [22].

$$V = V_f + V_s + V_c, \quad (12)$$

where V_c and V_s can be calculated using design guidelines like ACI 318-08.

You can determine the shear contribution of the FRP shear reinforcement by:

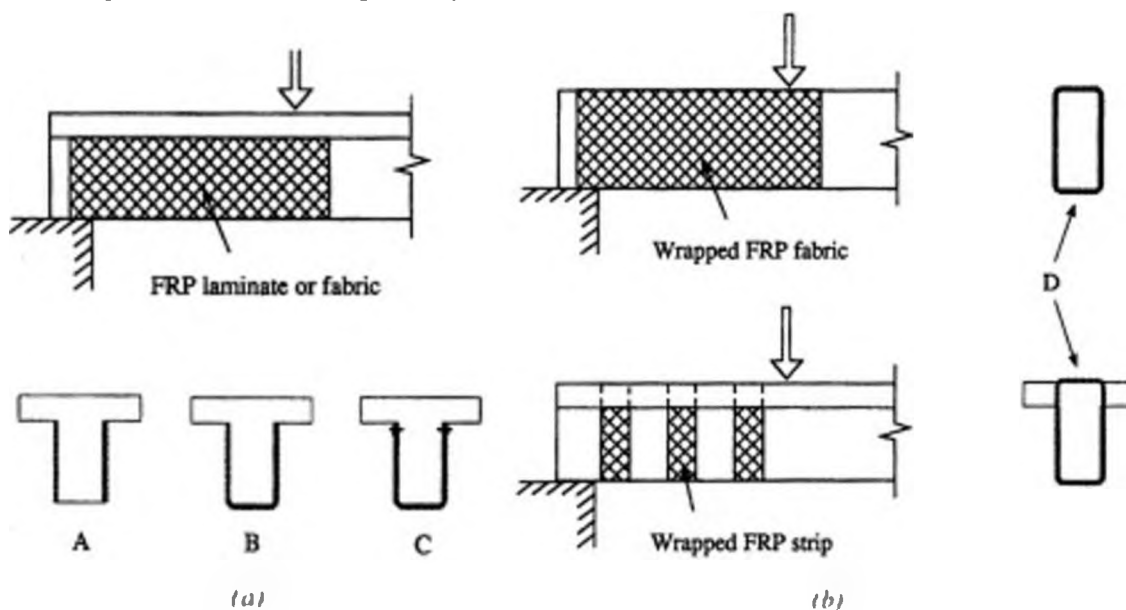


Fig. 6. Concrete shear reinforcement with FRP: a) laminates or textiles (b) strips or bundled textiles

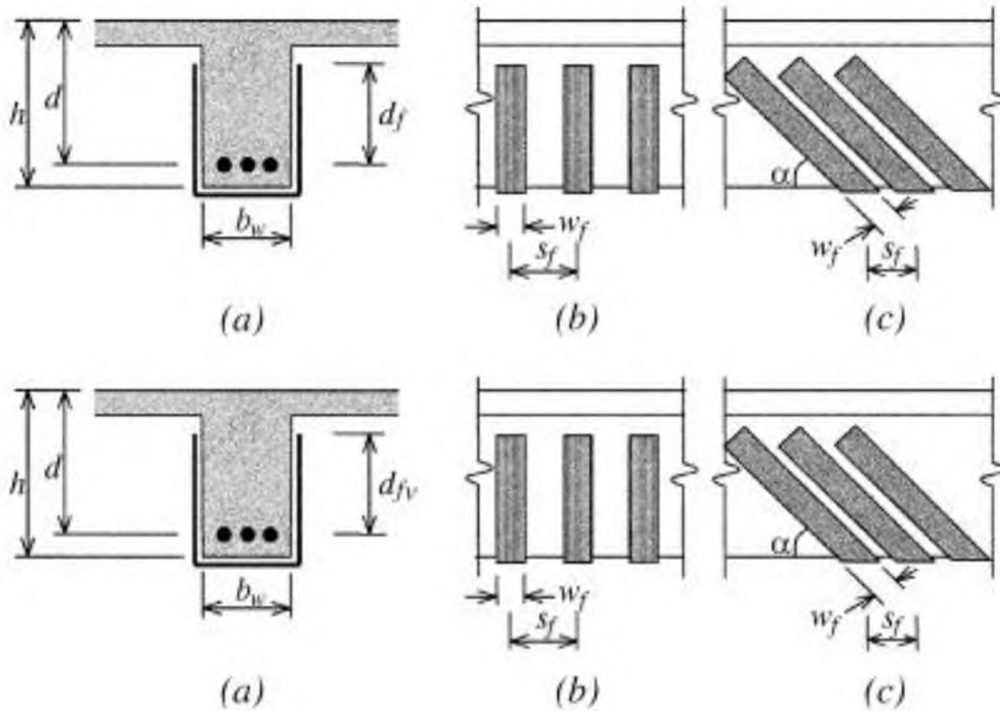


Fig. 7. The dimensions that are taken into account when doing shear-strengthening calculations for FRP laminate repairs, retrofits, or strengthening

$$V_f = \frac{A_f E_f \varepsilon_{fe} (\sin \beta + \cos \beta) d}{S_f}, \quad (13)$$

when A_f – area of FRP external reinforcement, mm^2 by equation 14;
 β – is the inclination angle of the FRP;
 S_f – is the width of the FRP, mm.

$$A_f = 2n t_f w_f, \quad (14)$$

when n – the number of FRP sheets;
 t_f – the thickness of the FRP, mm;
 w_f – width of FRP reinforcing plies, mm.

For applications that are entirely covered in FRP, the maximum strain used in the design should be kept to 0,4% by equation 15.

$$\varepsilon_{fe} = 0.004 \leq 0,75 \varepsilon_{fu}, \quad (15)$$

For systems with U-wrapped or bonded face ply, the FRP does not completely seal the portion. In order to evaluate the utilization and achievable effective strain level, bond stresses should be examined. The strain reduction coefficient K_v can be used to calculate the effective strain for U-wrapped or face plies by equation 16:

$$\varepsilon_{fe} = K_v \varepsilon_{fu} \leq 0,004, \quad (16)$$

This element is dependent on the strengthening plan, which in turn is dependent on the durability of the concrete, the kind of wrapping technique employed, and the stiffness of the sheets. The strain reduction factor is calculated by equation 17:

$$K_v = \frac{k_1 k_2 l_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0,75, \quad (17)$$

where the FRP sheet's effective length is given by equation 18:

$$l_e = \frac{23300}{(n_f t_f E_f)^{0.58}} \quad (18)$$

Two modification factors, k_1 and k_2 , by equation (19, 20) can be used to determine the remaining factors. These two elements are reliant on the wrapping strategy and concrete strength:

$$k_1 = \left(\frac{f_c}{27}\right)^{2/3} \quad (19)$$

$$k_2 = \frac{(d - l_e)}{d} \quad (20)$$

3.3. Analysis of Results

After calculating the loads applied to the concrete beam to be reinforced, according to the specifications in (ACI 318M-19) for the live and dead loads, where the live loads were 60 kN and the dead loads were 52 KN. After conducting the analysis of the concrete beam, it was found that the moment ultimate for this beam (ϕMu) was 397 kN·m and the ultimate shear strength (ϕVu) at (d) was 463,4 KN. We use strengthening with carbon-fiber plates, where carbon-fiber plates type (Sika® CarboDur® S512) were used to reinforce the concrete beam concerning moment strain and shear force. Where moment was obtained after using three layers of carbon fiber plates for strengthening moment strain and two layers for shear forces as in Fig. 8 equal to ultimate moment 397 kN·m which is greater than 397 kN·m. We got the shear force, we used two layers of carbon fiber

plates (Sika® CarboDur® S512) 492,8 kN which is greater than 463,4 kN.

Also, when using carbon fiber fabrics of the type (sika Wrap 301C) as in the Fig. 9 to strengthen the concrete beams in the direction of the moment, a moment of 442,2 kN·m was obtained using a layer. Shear strength was obtained by using carbon fiber fabrics type (sika Wrap 530C) in the form of four layers.

We also studied the strengthening using carbon-fiber rods of the type (Sika® CarboDur® BC12) in the direction of the moment as in Fig. 10, and a moment of 443 kN·m was obtained when using two of the rods. The shear forces were strengthen using carbon fiber fabrics type (sika Wrap 530C)

Fig 11 shows the comparison between the prices of using composite materials in different ways to strengthening the beams and in Russian rubles.

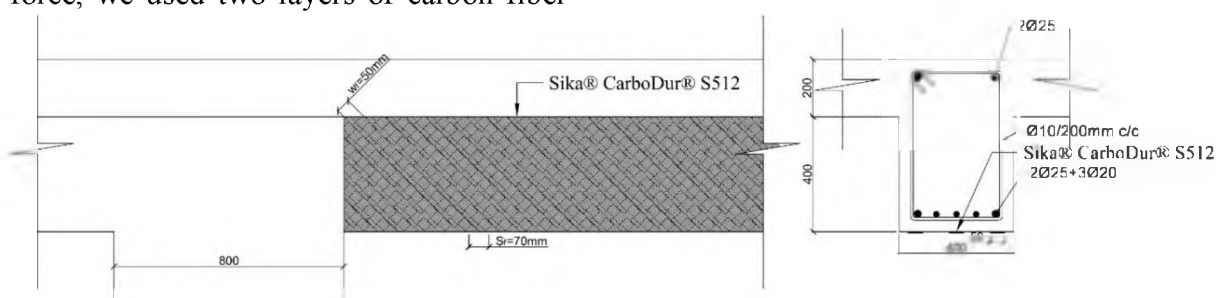


Fig. 8. Strengthening by carbon fiber plates

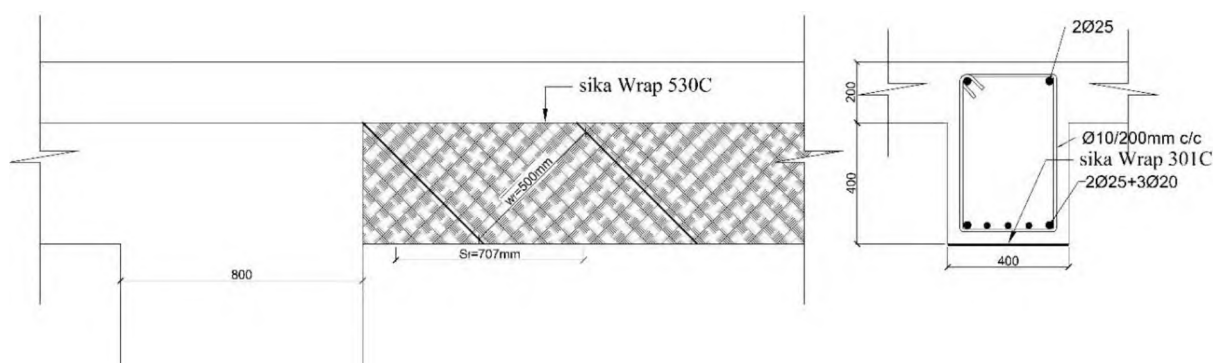


Fig. 9. Strengthening by carbon fiber fabrics

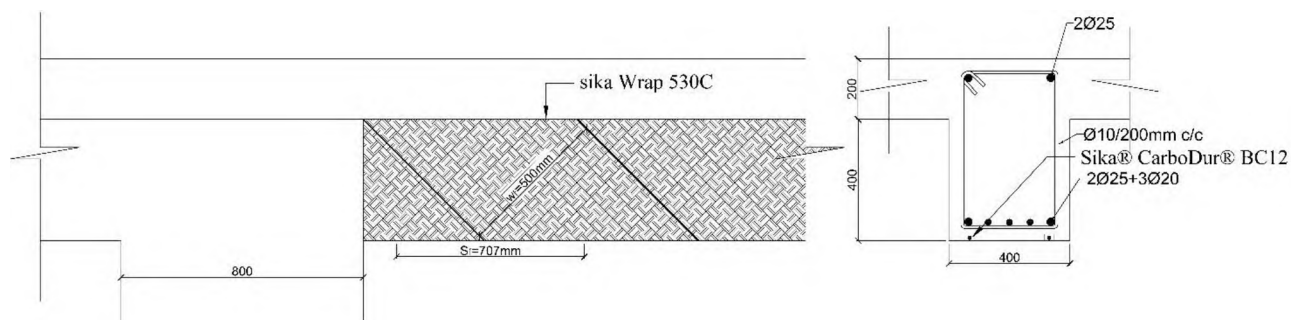


Fig. 10. Strengthening by carbon-fiber rods

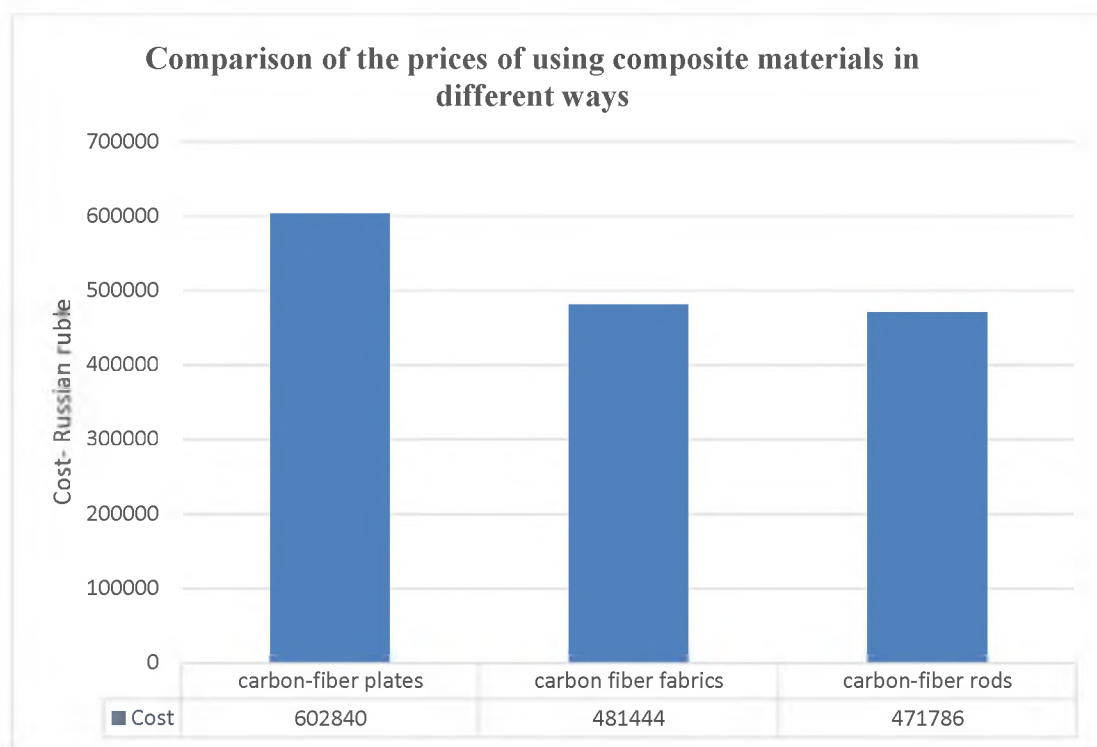


Fig. 11. Comparison of the prices of using composite materials in different ways

4. Conclusions

1. Strengthening of reinforced concrete beams with carbon fiber plates does not require much workers, is easy to install, but at the same time it is the most costly method and remains vulnerable to external mechanical factors.

2. Strengthening using carbon-fiber fabrics and carbon-fiber rods close to the surface, are similar in terms of cost and lower than the cost of reinforcement with carbon fiber plates, but strengthening with carbon-fiber fabrics, is considered easier to implement and does not require a lot of workers, as well as it can be easily formed. The strengthening with carbon fiber rods

requires more worker and more skill, and one of its advantages is that it is less susceptible to external mechanical factors.

3. Through the results that have been studied, it turns out that the strengthening using carbon fiber fabrics is the best in terms of price as well as time and effort.

References

1. Jumaat, M. Z., & Alam, M. A. (2009). Strengthening of RC beams using externally bonded plates and anchorages. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(3), 2207–2211. (In English).
2. Zemlyakov, Yu. A., & Kubasov, A. Yu. (2018). Feasibility study of options for reinforcing reinforced concrete floor beams. *Engineering Bulletin of the Don*, (1 (48)), 101. (In Russian).

3. Jayaprakash, J., Pournasiri, E., Choong, K. K., Tan, C. G., & De'nan, F. (2011). External CFRP repairing of pretested beams reinforced using prestress rebars. *Journal of reinforced plastics and composites*, 30(20), 1753–1768.
4. SHEVTSOV, D. A. (2014). Reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials. *Industrial and Civil Engineering*, (8), 61–65. (In Russian).
5. Ispandiyarova, U. E. K. (2020). Reinforcement of reinforced concrete bridge beams with high-strength composite materials. *European science*, (6), 55, 63–67. (In Russian).
6. Kudryavtsev, S. V. (2013). Evaluation of the bearing capacity of reinforced concrete thickeners reinforced with composite materials. *Academic Bulletin UralNIIproekt RAASN*, (2), 91-96. (In Russian).
7. Architectural and construction complex: problems, prospects, innovations [Electronic resource]: electronic collection of articles of the international scientific conference dedicated to the 50th anniversary of Polotsk State University, Novopolotsk, and April 5–6., 2018 / Polotsk State University; ed. A. A. Bakatovich, L. M. Parfenova. – Novopolotsk, 2018. (In Russian).
8. Klyuev, A. V. (2011). Reinforcing bending structures with carbon fiber composites. *Bulletin of the Belgorod State Technological University*. VG Shukhova, (3), 38-41. (In Russian).
9. Kudryavtsev, S. V., Kudryavtsev, V. A., & Guryanov, Y. V. (2014). An effective solution to increase the carrying capacity of road bridges. *Academic Bulletin UralNIIproekt RAASN*, (1), 80-83. (In Russian).
10. Rimshin, V. I., & Merkulov, S. I. (2018). On the issue of strengthening reinforced concrete structures with external reinforcement with composite material. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*, 20(5), 92–100. (In Russian).
11. Paranicheva, N. V., & Nazmeeva, T. V. (2010). Strengthening building structures with carbon composite materials. *Journal of Civil Engineering*, (2), 19–22. (In Russian).
12. Afanasiev, A. B. (2017). Reinforcement of reinforced concrete beams. In *The current state, problems and prospects for the development of branch science* (pp. 10–11). (In Russian).
13. De Lorenzis, L., Nanni, A., & La Tegola, A. (2000, May). Strengthening of reinforced concrete structures with near surface mounted FRP rods. In *International meeting on composite materials, PLAST* (pp. 9–11).
14. Ziatyuk Y.Y. (2016). Leadthrough technology operations works at strengthening of pre-production reinforced concrete models (firm «SIKA» materials). *Resource-saving materials, constructions, buildings and structures*, (32), 466–475.
15. Diachkova, A. A., & Kuznetsov, V. D. (2009). Calculation of reinforcement of reinforced concrete slabs with carbon composite materials. *Magazine of Civil Engineering*, (3), 25–28. (In Russian).
16. Faris, S. T., Al-katawy, A. A., & Kadhum, A. M. (2021). Improvement of the Mechanical Characteristics of Fiber Metal Laminate (FMLs) Used for Aircraft Wing Using Epoxy-Resole. *Diyala Journal of Engineering Sciences*, 14(4), 79–89.
17. Akbas, T. T., Celik, O. C., Yalcin, C., & Ilki, A. (2016). Monotonic and cyclic bond behavior of deformed CFRP bars in high strength concrete. *Polymers*, 8(6), 211.
18. Jiang, C., Wu, Y. F., & Wu, G. (2014). Plastic hinge length of FRP-confined square RC columns. *Journal of Composites for Construction*, 18(4), 04014003.
19. ACI Committee 440. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures (440.2R-08). Farmington Hills, MI: American Concrete Institute. 2008. – Pp. 23–31. (In Iraq).
20. Triantafillou, T. C. (1998). Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded FRP composites. *ACI structural journal*, 95, 107–115. (In Iraq).
21. Code, A. C. I. (2005). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-05) and commentary (ACI 318R-05). American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.
22. A Zaher, A. H., Montaser, W. M., & M Elsonbaty, M. (2020). Strengthening and Repairing of RC Deep Beams Using CFRP and GFRP. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 11(1).

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

DOI 10.15826/rjst.2022.1.004

УДК 691

Залесова П. С.¹, Никитина Н. П.²

^{1,2} Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия
e-mail: ¹ zalesova1205@yandex.ru, ² artnatash@gmail.com

ИННОВАЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ – ВЫЯВЛЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ В СОЦИОЛОГИЧЕСКОМ ОПРОСЕ

Аннотация. Применение инновационных строительных материалов – актуальный вопрос в современном строительстве. Проведен социологический опрос по задачам исследования. Использование ETFE пленок (ETFE – ethylene tetrafluoroethylene или ЭТФЭ – этилентетрафторэтилен, или частично фторированный сополимер этилена и тетрафторэтилена) основано как на возможности реализации практически любых идей дизайнеров и архитекторов в оформлении фасадов и крыш невозможных сооружений, так и на специфических особенностях данного фторополимера. Представлены характеристики и обоснованы преимущества данного полимерного материала. Инновация в строительстве является новшеством, обеспечивающим качественный рост эффективности процессов возведения и эксплуатации зданий и сооружений. Строительная мембранная технология, основанная на использовании композиционного полимерного материала-пленки ETFE, обладает комплексом преимуществ по сравнению с традиционными технологиями.

Ключевые слова. Инновация, строительные технологии, полимеры, мембранная технология, характеристики, безопасность, срок эксплуатации, экологичность, актуальность, компактность, энергоэффективность.

Zalesova P. S.¹, Nikitina N. P.²

^{1,2} Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia
e-mail: ¹ zalesova1205@yandex.ru, ² artnatash@gmail.com

INNOVATIVE POLYMER MATERIALS – IDENTIFYING THE PROBLEM IN A SOCIOLOGICAL SURVEY

Abstract. The use of innovative building materials is a topical issue in modern construction. A sociological survey was conducted on the objectives of the study. The use of ETFE films is based both on the possibility of implementing almost any ideas of designers and architects in the design of facades and roofs of various structures, and on the specific features of this fluoropolymer. The characteristics are presented and the advantages of this polymeric material are substantiated. Innovation in construction is an innovation that provides a qualitative increase in the efficiency of the processes of erection or operation of buildings and structures. The construction membrane technology based on the use of a composite polymer material-ETFE film (ETFE – ethylene tetrafluoroethylene or ETFE – ethylene tetrafluoroethylene, or partially fluorinated copolymer of ethylene and tetrafluoroethylene) has a set of advantages compared to traditional technologies.

Keywords. Innovation, construction technologies, polymers, membrane technology, characteristics, safety, service life, environmental friendliness, relevance, compactness, energy efficiency.

1. Введение

Строительство зданий и сооружений, как одна из основных отраслей экономики, должна иметь постоянное развитие. В частности, этого можно достичь благодаря внедрению инновационной деятельности строительных организаций, разработке инновационных строительных материалов и технологий.

В современном мире понятие «инновация» очень распространено. Обычно оно упоминается в контексте высоких технологий.

Инновационные строительные технологии и материалы в России с трудом пробивают себе дорогу. На западном рынке главным локомотивом, тянущим за собой инновационные продукты, становятся строительные компании. У нас инновационные продукты чаще всего внедряют фирмы-производители строительных материалов.

Разработки технологий синтеза всех фторполимеров во времена СССР проводились в Ленинграде, в Охтинском НПО «Пластполимер», одном из трех центров фторполимерной химии, к которым относились также Государственный институт Прикладной Химии и ВНИИСК им. С.В. Лебедева. Промышленное производство фторсополимера этилена с тетрафторэтиленом -фторопласта-40 было освоено в 1961 году на Кирово-Чепецком химическом комбинате. Начало промышленного выпуска сополимера этилена с тетрафторэтиленом за рубежом под торговой маркой ETFE началось компанией Du Pont только с 1972 года. Фторсополимеры разрабатывались в первую очередь для нужд военной и космической промышленности и обладали высокой стоимостью. Практически сразу из фторсополимеров

типа ETFE начали изготавливаться пленки методом плоскощелевой экструзии [1, 2, 3].

В настоящее время сырьем для производства отечественных пленок у фирм-производителей служат специальные марки фторопластов: Ф-40АМ, Ф-40Ш, Ф-40М, Ф40ВЭМ, Ф-40БМ, а также новые марки ОАО "Галоген" – FLUOROPLAST-40 HALEONTM и некоторые другие. За рубежом к основным производителям пленок из ETFE относятся:

- Asahi Glass Company, марки Fluon® ETFE FILM и F-CLEAN®;
- Daikin, марка NEOFLON™ ETFE;
- Nowoflon Kunststoffprodukte GmbH & Co., марка Nowoflon ET Film;
- Chemours Company FC, марка Tefzel™ ETFE film;
- Polyflon Technology Limited, марка FLONFILM™ 300 ETFE;
- Saint-Gobain Performance Plastics, марка Chemfilm ETFE Film;
- Vector Foiltec, марка Texlon.

Мембраны из ETFE – это современный полимерный материал, сочетающий положительные свойства полиэтилена и политетрафторэтилена, который в десятки раз легче стекла, при этом является прекрасным теплоизолятором, эстетически удачно смотрится, при желании может быть модернизирован с целью аккумуляции солнечной энергии. И практически по всем остальным параметрам этот материал не уступает другим ограждающим конструкциям [4-7].

Строительная мембранная технология, основанная на использовании композиционного полимерного материала-пленки ETFE, обладает комплексом преимуществ по сравнению с традиционными технологиями. Эти преимущества строительной мембранной технологии основаны на уникальных физико-

химических свойствах пленки ETFE, которые являются результатом многолетнего цикла исследований, разработок и испытаний, проведенных зарубежными и советскими учеными.

Наиболее обширное применение ETFE пленок основано как на

возможности реализации практически любых идей дизайнеров и архитекторов в оформлении фасадов и крыш всевозможных сооружений (рис. 1 и 2), так и на специфических особенностях данного фторполимера [8-13].



Рис. 1. Фасад стадиона Allianz Arena из полимерной ETFE-пленки. Архитектурное бюро Herzog & de Meuron Architekten. 2005 г. Германия, г. Мюнхен.



Рис. 2. Аквапарк Питерлэнд, Россия, г. Санкт-Петербург

Характерными особенностями ETFE пленок, определяющими в архитектуре конкурентные преимущества являются следующие свойства.

1. Высокие физико-механические характеристики

Предел прочности при разрыве составляет от 40 до 65,2 МПа, что существенно превосходит полиолефиновые пленки (до 40 МПа). Такие свойства позволяют противостоять экстремальным нагрузкам, в т.ч. связанным с техногенными катастрофами.

2. Малый вес

Плотность в пределах 1650-1760 кг/м³. Такие пленки легче стекла в 100 раз и не требуют массивных поддерживающих конструкций.

3. Возможность перекрытия больших пролетов

Ширина полотен может составлять от 2 до 5 метров, а длина превышать 50 м. Возможности термоконтактной сварки термопластичного фторполимера ETFE способствуют изготовлению весьма крупных архитектурных элементов, что особенно наглядно видно в инновационных проектах павильонов стран мира на предстоящей выставке EXPO 2020 в Дубае.

4. Безопасность конструкций при пожаре

ETFE не горит, по DIN EN 13 501-1 продукт относится к самозатухающим материалам. Пленка ETFE относится к группе горючести Г1, не распространяет горение и не образует капель при оплавлении.

5. Гарантийный срок эксплуатации

Срок эксплуатации оценивается в 30-50 лет. Далее пленка может быть переработана.

6. Самоочищаемость поверхности пленки

На пленке не скапливаются пыль и грязь, на её поверхности не закрепляются простейшие микроорганизмы и водоросли. Для очистки достаточно ливневого дождя

для смывания пыли или любых природных/техногенных загрязнений.

7. Энергосбережение

Использование «подушечной» технологии позволяет уменьшить теплопередачу за счет изолированных слоев воздуха в конструкциях. Поэтому затраты на охлаждение/отопление покрываемых помещений уменьшаются.

8. Отсутствие внутреннего шума

9. Пригодность к технологиям умного дома

Пленка ETFE отлично инкапсулирует внутри себя солнечные элементы, датчики освещенности, температуры, другую электронику, включая широкие панели LED экранов. Путем модификации угла отражения высокоэнергетической части солнечного спектра многослойными ETFE пленками, можно добиться того, что в помещениях, не будет жарко в солнечные дни [14-16].

10. Экологичность пленки

Применение пленки ETFE снижает уровень выбросов CO₂ в окружающую среду. И вместе с этим реализуются различные биофермные проекты, направленные на создание в городской среде более комфортных условий пребывания путем очистки окружающего воздуха, регулирования освещенности, генерации биомассы для топлива, пищевых добавок или биологических удобрений.

Другие уникальные качества:

- широкий спектр архитектурных и инженерных решений для современных зданий и сооружений;
- высокая прочность на разрыв;
- широкий рабочий диапазон температур наружного воздуха;
- долговечность;
- прозрачность для ультрафиолетового излучения;
- стойкость к химической коррозии;
- устойчивость к ветровым нагрузкам;
- адаптивность к снеговым и ливневым нагрузкам;
- высокая эффективность;

- светопроницаемость, регулируемая светопрозрачность;
- стерильность и автономность закрытого пространства;
- высокая эстетичность восприятия формы;
- отличная ремонтная технологичность;
- большие размеры покрываемого пространства;
- сжаты сроки и малые затраты на монтаж оболочки;
- компактность и небольшой вес транспортных модулей.

2. Задачи исследования

В процессе исследования необходимо доказать актуальность применения инновационной строительной технологии или материала, которые должны соответствовать одному или нескольким из критериев:

- упрощение и ускорение процесса строительства;
- снижение себестоимости строительства или эксплуатационных расходов;
- повышение энергоэффективности объекта;
- увеличение жизненного цикла здания или сооружения.

На сегодняшний день строительная сфера, по сравнению с другими отраслями, характеризуется слабым уровнем развития инновационной деятельности [17, 18]. Основными факторами, сдерживающими развитие инновационной деятельности в строительной сфере, которые необходимо преодолеть, являются:

- недоверие к инновациям со стороны клиентов;
- нехватка финансовых ресурсов, необходимых для инновационных исследований;
- низкий уровень поддержки инновационной деятельности со стороны государства;

- преобладание на рынке фирм, не имеющих ресурсов для внедрения инноваций.

3. Подготовительные мероприятия к социологическому опросу

Для сбора данных по вопросам темы исследования был применен метод анкетирования. В ходе подготовки был составлен список проблем, которые должны отразить в опросе.

1. Отсутствие желания/мотивации у специалистов узнавать об инновационных решениях/материалах в области строительства;
2. Наличие стереотипов/предубеждений по отношению к инновационным материалам;
3. Отсутствие достаточного опыта в использовании инновационных материалов, что вызывает недоверие у архитекторов и других участников строительства, причастных к выбору строительных материалов.

4. Проведение социологического опроса

Опрос проводился с использованием Google Форм. Распространение опроса проводилось посредством социальных сетей (VK, Telegram).

Время прохождения опроса – 3-5 минут. Это оптимальное время, т. к. целевым респондентам вряд ли захочется отвечать на опросы, которые займут больше времени и будут требовать множество развернутых ответов.

Участниками опроса являлись действующие архитекторы и другие специалисты, так или иначе причастные к выбору строительных материалов при проектировании зданий и сооружений.

В опросе были вопросы с выбором ответа, также была возможность дописать свой ответ при отсутствии его в предложенных вариантах, и вопросы с развернутым ответом.

5. Анализ результатов

По итогам анализа полученных результатов все ответы были сведены к общему ряду проблем.

1. Почти половина опрошенных специалистов не следит за появлением инновационных решений в области строительства;
2. Участники опроса считают, что для применения инновационных материалов необходимо тратить время на поиск новых инновационных решений и проведение сравнительного анализа существующих и новых разработок;
3. В связи с вышесказанным, основным фактором игнорирования инновационных решений является

отсутствие достаточного опыта их применения на реальных объектах;

4. Также отталкивающим фактором является высокая стоимость таких материалов.

Подавляющее большинство опрошиваемых специалистов находятся в возрасте от 18 до 25 лет – 93,3 % (рис. 3). Из них 66,7 % являются выпускниками кафедры Архитектуры (рис. 4). Из числа опрошиваемых за появлением новых инновационных решений в области строительства следят 60 % (рис. 5). Большинство опрошиваемых узнают о появлении инноваций в области строительства из открытых источников в интернете и на различных строительных форумах, чуть меньше – на работе (рис. 6).

1. Ваш возраст находится в пределах:

15 ответов



Рис. 3. Диаграмма возраста респондентов

2. Студентом/выпускником какого направления Вы являетесь?

15 ответов



Рис. 4. Диаграмма направления образования респондентов (студентов, выпускников)

3. Следите ли Вы за появлением новых материалов/решений в области строительства?
15 ответов

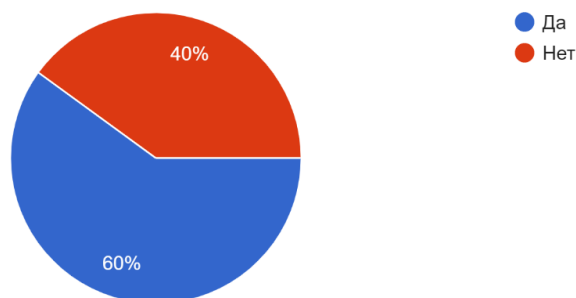


Рис. 5. Диаграмма отслеживания появления новых материалов/решений в области строительства

4. Откуда Вы чаще всего узнаете о появлении новых строительных материалов?
15 ответов

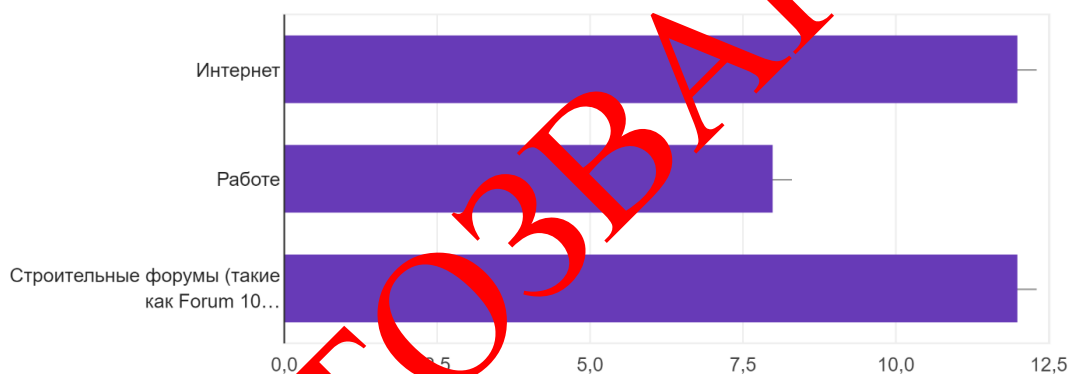


Рис. 6. Диаграмма источников информации, используемых респондентами

5. От чего зависит выбор материалов для строительства?
15 ответов

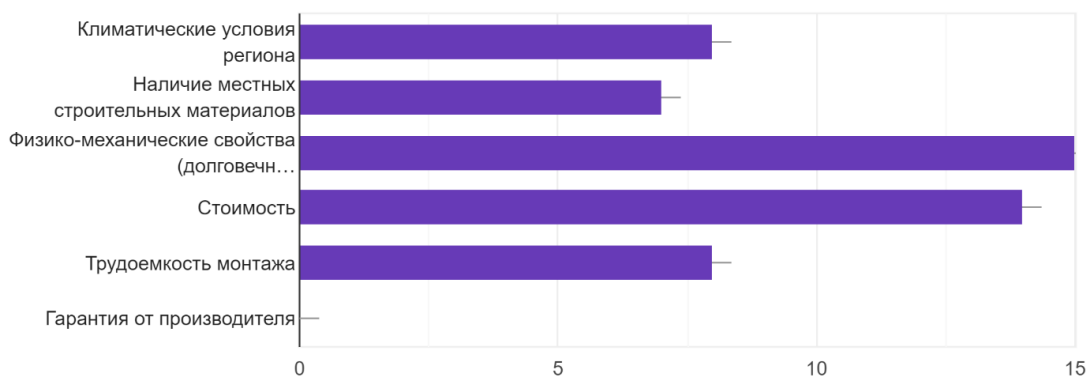


Рис. 7. Диаграмма факторов выбора материалов для строительства

6. Готовы ли Вы рассматривать вопрос применения инновационных строительных материалов?
15 ответов

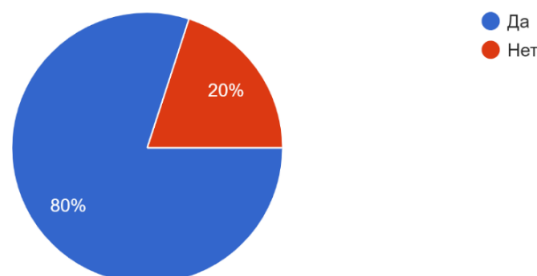


Рис. 8. Диаграмма готовности респондентов применять инновационные строительные материалы при строительстве зданий и сооружений.

8. Каких затрат, по вашему мнению, требует применение новых строительных материалов?
15 ответов

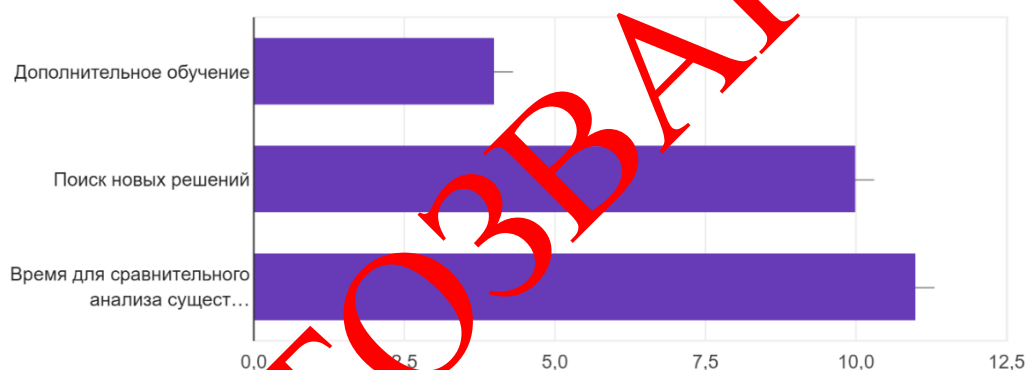


Рис. 9. Диаграмма необходимых затрат, по мнению респондентов

По мнению опрошенных, выбор материалов при строительстве зависит от физико-механических свойств самого материала, а также его стоимости. Меньшими по важности факторами для выбора являются климатическими условиями региона, наличие местных строительных материалов и трудоемкость монтажа конструкций (рис. 7).

Несмотря на наличие у многих специалистов различных сомнений и предубеждений насчет применения инновационных строительных материалов, подавляющее большинство опрошенных признали готовность рассмотрения их применения при

проектировании новых объектов (рис. 8).

Те, кто выразили такое желание, назвали следующие случаи, когда это может быть возможно и целесообразно:

- возведение уникальных/умных зданий;
- соответствие цена/качество;
- низкая цена;
- характеристики инновационных материалов лучше, чем у традиционных.

Участники опроса посчитали, что наиболее затратным является поиск новых инновационных решений и время для проведения сравнительного анализа

существующих и новых разработок (рис. 9).

Самыми распространенными предубеждениями/недостатками в отношении инновационных разработок оказались их высокая стоимость и отсутствие достаточного опыта их применения на практике (рис. 10).

Соответственно уровень доверия к инновационным строительным материалам определяется наличием положительного опыта их использования, наличием сертификатов

качества и гарантии от производителей (рис. 11).

Более 50% участников опроса знакомы с ETFE-пленками, также больше половины опрошенных знают про такие инновационные материалы, как токопроводящий бетон, деревобетон и несъемная опалубка (рис. 12). Практически все участники опроса считают, что вопрос выбора инновационных строительных материалов стоит за архитектором (рис. 13).

9. Какие по вашему мнению существуют стереотипы по отношению к тем или иным инновационным материалам?
15 ответов



Рис. 10. Диаграмма существующих предубеждений в отношении инновационных разработок

10. От чего зависит уровень доверия к инновационным строительным материалам?
15 ответов

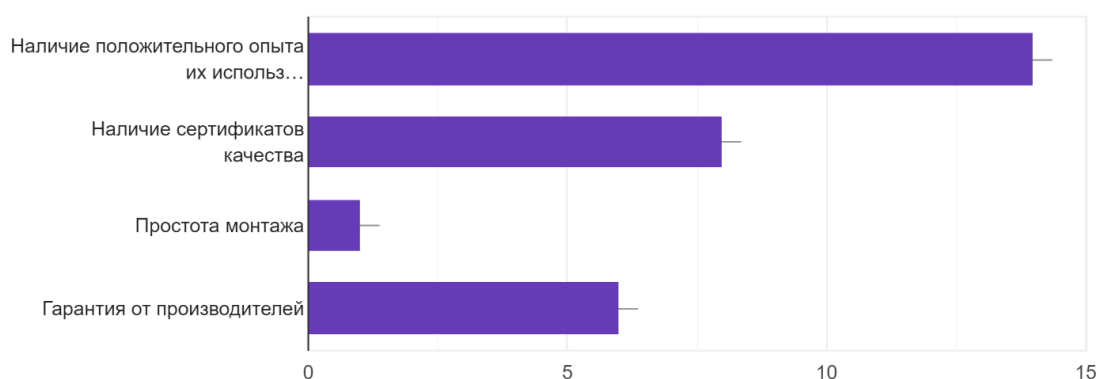


Рис. 11. Диаграмме факторов доверия к инновационным строительным материалам

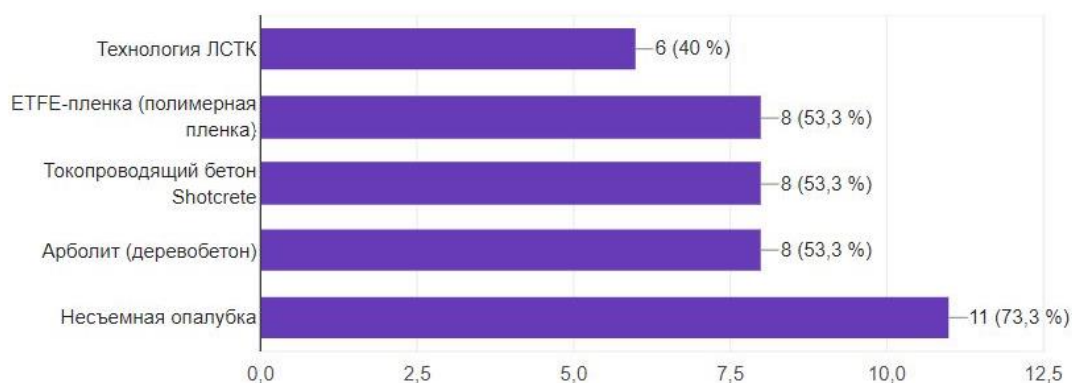


Рис. 12. Наиболее известные инновационные материалы среди участников опроса

13. Кто чаще проявляет инициативу в выборе инновационных строительных материалов?
9 ответов

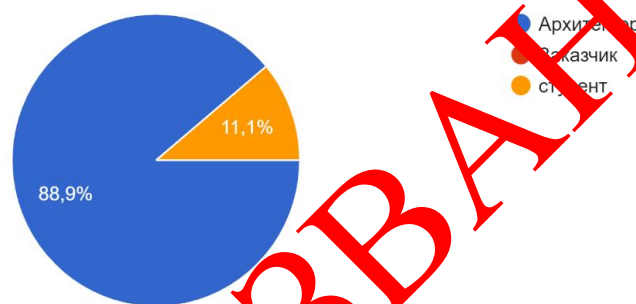


Рис. 13. Диаграмма инициаторов выбора инновационных материалов

6. Выводы

Проведенный опрос показал, что выявленные проблемы по отношению к инновационным строительным материалам действительно существуют.

1. Отсутствие желания/мотивации у специалистов узнавать об инновационных решениях/материалах в области строительства;
2. Наличие стереотипов/предубеждений по отношению к инновационным материалам;
3. Отсутствие достаточного опыта в использовании инновационных материалов, что вызывает недоверие у архитекторов и других участников

строительства, причастных к выбору строительных материалов.

В настоящее время застройщики отдают предпочтение материалам, которые давно используются на строительных площадках (кирпич, бетон, дерево). Свойства этих материалов хорошо изучены, опыт их применения широкий и разнообразный. Здание, возведенное из этих материалов, имеет хорошо рассчитываемые и прогнозируемые характеристики. Однако именно такой подход становится препятствием для внедрения инновационных технологий для улучшения/ускорения строительства, повышения энергоэффективности и увеличения жизненного цикла здания.

Инновации в строительстве – это внедрённые новшества, которые гарантируют качественный рост эффективности процессов возведения или эксплуатации зданий и сооружений. Такое новшество обязательно должно быть востребовано на рынке и иметь практический опыт применения.

Исходя из этого можно сделать вывод, что эффективность инноваций напрямую зависит от степени их выгоды и востребованности среди застройщиков.

Строительная мембранная технология, основанная на использовании композиционного полимерного материала-пленки ETFE, обладает комплексом преимуществ по сравнению с традиционными технологиями. Она позволяет увеличить жизненный цикл здания за счет своей долговечности, экологичности и стойкости к химическим и природным нагрузкам. Данная технология является актуальной для применения в качестве оформления фасадов общественных зданий, а также в теплично-парниковом строительстве, при возведении крупных оранжерей и центров досуга флорой и фауной тропических зон.

Список используемых источников

1. *Артеменко А. А.* Актуальные вопросы инновационного развития строительства // Молодой ученый. 2021. № 11 (91). С. 742-744. – URL: <https://moluch.ru/archive/91/19447/> (дата обращения: 29.01.2021).
2. *Купцов М. М.* Инновации как основа конкурентоспособности предприятия // М.: Синергия, 2018. 851 с.
3. *Соловей А. А.* Анализ специфики инновационной деятельности в строительной сфере // Статистика и экономика. 2014. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-spetsifiki-innovatsionnoy-deyatelnosti-v-stroitelnoy-sfere/viewer/> (дата обращения: 29.01.2021).
4. *Попова Анна.* Конкурентоспособность инновационной строительной продукции // М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2018. 128 с.
5. *Annette LeCuyer.* ETFE: Technology and Design. //Berlin : Birkhäuser, 2008. – 160 с.
6. *Jiri G. D.* Technology of Fluoropolymers // New York : CRC Press, 2001. – 184 с.
7. *Zhaoc Zhongwei, Liu Hongbo, Chen Zhihua.* Thermal behavior of large-span reticulated domes covered by ETFE membrane roofs under solar radiation // Thin-Walled Structures. – 2017. – № 115. – С. 1-11.
8. *Lamnatou Chr, A. Morenoa, D. Chemisanaa.* Ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) material: Critical issues and applications with emphasis on buildings //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – № 82. – С. 2186-2201.
9. Buildings with ETFE foils: A review on material properties, architectural performance and structural behavior / Hu Jianhui, Chena Wujun, Zhaoa Bing, Yang Deqing // Construction and Building Materials. – 2017. – № 141. – С. 411-422.
10. *Maywald Carl, Riesser Florence.* Sustainability – The Art of Modern Architecture // Procedia Engineering. – 2016. – № 155. – С. 238-248.
11. *Monticelli Chiara, Zanelli Alessandra.* Material saving and building component efficiency as main eco-design principles for membrane architecture: case studies of ETFE enclosures // Architectural Engineering and Design Management. – 2020. – № 17. – С. 264-280.
12. *A. Menéndez, A. Santos, B. Ruiz.* A multifunctional ETFE module for sustainable façade lighting: Design, manufacturing and monitoring // Energy and Buildings. – 2018. – № 161. – С. 10-21.
13. *Chilton John.* Lightweight envelopes: ethylene tetra-fluoro-ethylene foil in architecture // Construction Materia. – 2015. – № 166. – С. 343-357.
14. *Бессонов А. К., Верстина Н.Г., Кулаков Ю.Н.* Инновационный потенциал строительных предприятий. Формирование и использование в процессе инновационного развития // М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2019. 168 с.
15. *Киреева Ю.И.* Современные строительные материалы и изделия : [справочник] // Ростов-на-Дону : Феникс, 2010. — 245 с. : ил. ; 21 см. – (Справочник). – Тираж 3000 экз. – Библиогр. в конце разд. – ISBN 978-5-222-17246-9.
16. Современные строительные материалы. Технологии работ / [рук. проекта С. М. Кочергин; гл. ред. А. Д. Жуков] — Москва: Стройинформ, 2007. – 720 с.: ил.; 27 см. – (Застройщик). – ISBN 5-94418-004-8.
17. *Худяков В.А., Прошин А.П., Кислицына С.Н.* Современные композиционные строительные материалы : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности "Пр-во строит. материалов, изделий и конструкций" направления подгот. "Стр-во". – Москва: АСВ, 2006. – 144 с. : ил., фот. – Библиогр.: с. 139 (11

назв.). – Допущено в качестве учебного пособия. – ISBN 5-93093-410-X.

18. Строительные материалы и изделия: учебное пособие для студентов вуза, обучающихся по направлению подготовки 08.03.01, 08.04.01 – Строительство / [В. С. Руднов, Е. В. ВладимIROVA, И. К. Доманская, Е. С. Герасимова]; под общ. ред. И. К. Доманской ; Урал. федер. ун-т им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, [Ин-т новых материалов и технологий]. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2018. – 204 с. : ил. – Авт. указаны на обороте тит. л. – Библиогр.: с. 198 (10 назв.). – ISBN 978-5-7996-2352-4.

References

1. Artemenko A.A. (2015) Aktual'nye voprosy innovatsionnogo razvitiya stroitel'stva [Topical issues of innovative development of construction]. Young scientist, № 11 (91), 742-744. – URL: <https://moluch.ru/archive/91/19447/> (In Russian).
2. Kuptsov M.M. (2018) Innovatsii kak osnova konkurentosposobnosti predpriyatiya [Innovations as the basis of enterprise competitiveness] (851 с.). Moscow: Synergia. (In Russian).
3. Solovei A.A. (2014) Analiz spetsifiki innovatsionnoi deyatel'nosti v stroitel'noi sfere [Analysis of the specifics of innovative activity in the construction industry]. Statistics and economic №4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-spetsifiki-innovatsionnoy-deyatelnosti-v-stroitelnoy-sfere/viewer> (In Russian).
4. Popova A. (2018) Konkurentosposobnost' innovatsionnoi stroitel'noi produktitsii [Competitiveness of innovative construction products] (128 с.). Moscow: LAP Lambert Academic Publishing (In Russian).
5. Annette, LeCuyer (2008) ETFE: Technology and Design (160 с.). Berlin : Birkhäuser (In English)
6. Jiri, G. D. (2001) Technology of Fluoropolymers (184 с.). New York : CRC Press
7. Zhaoc Zhongwei, Liu Hongbo, Chen Zhihua. (2017) Thermal behavior of large-span reticulated domes covered by ETFE membrane roofs under solar radiationlar radiation. Thin-Walled Structures (pp.1-11). – № 115.
8. Lamnatoua Chr, A. Morenoa, D. Chemisanaa (2017) Ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) material: Critical issues and applications with emphasis on buildings Renewable and Sustainable Energy Reviews (pp. 2186-2201). – № 82.
9. Hu Jianhui, Chena Wujun, Zhaoa Bing, Yang Deqing (2017) Buildings with ETFE foils: A review on material properties, architectural performance and structural behavior. Construction and Building Materials. (pp.411-422) – № 131.
10. Maywald Carl, Riesser Florence. Sustainability (2016) The Art of Modern Architecture. Procedia Engineering (pp.238-248). – № 155.
11. Monticelli Carol, Zanelli Alessandra. (2020) Material saving and building component efficiency as main eco-design principles for membrane architecture: case - studies of ETFE enclosures. Architectural Engineering and Design Management (pp.264-280). – № 17.
12. A. Menéndez, A. Santos, B. Ruiz. (2018) A multifunctional ETFE module for sustainable façade lighting: Design, manufacturing and monitoring. Energy and Buildings (pp.10-21). – № 161.
13. Chilton John (2015) Lightweight envelopes: ethylene tetrafluoro-ethylene foil in architecture. Construction Materia (pp.343-357). – № 166.
14. Bessonov A.K., Verstina N.G., Kulakov Yu.N. (2019) Innivatsionnyi potentsial stroitel'nykh predpriyatii. Formirovanie i ispol'zovanie v protsesse innovatsionnogo razvitiya. [Innovative potential of construction enterprises. Formation and use in the process of innovative development]. (168 с.). Moscow: Publishing House of the Association of Construction Universities (In Russian).
15. Kireeva Yu. I. (2010) Sovremennie stroitel'nie materialy i izdeliya [Modern building materials and products] (245 с.). Phoenix (In Russian).
16. Kochergin S.M., Zhukov A.D. (2007) Sovremennie stroitel'nie materialy. Tehnologii rabot [Modern building materials. Work technologies]. (720 с.) Moscow: Stroyinform (In Russian)
17. Hudyakov V.A., Proshin A.P., Kislitsina S.N. (2006) Sovremennie kompozitsionnie stroitel'nie materialy [Modern composite building materials]. (144 с.). Moscow: ABC (In Russian).
18. Rudnov V.S., Vladimirova E.V., Domanskaya I.K., Gerasimova E.S. (2018) Stroitel'nie materialy i izdeliya [Construction materials and products] (204 с.) Ekaterinburg: Ural State University (In Russian).

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ И АРХИТЕКТУРЕ

DOI 10.15826/rjst.2022.1.005

УДК 004, 69

Миронова Л. И.¹, Фомин Н. И.², Винокуров Д. С.³, Огородникова С. С.⁴

1, 2, 3, 4 Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

e-mail: ¹mirmila@mail.ru, ²nnimoff@mail.ru, ³danil.vinokurov.1999@mail.ru,

⁴sveta.ogorodnikova.999@mail.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ВОЗМОЖНОСТЬ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

Аннотация. Целью статьи является показать направление применения цифровых технологий в процессе цифровой трансформации строительной отрасли на основе теоретического анализа таких существующих цифровых технологий, как большие данные, искусственный интеллект, машинное обучение, нейронные сети, человеко-машинный интерфейс, виртуальная реальность, интернет вещей, роботизация и пр., что определяет практическую значимость проведенного исследования. Анализ исторического и технологического аспектов становления цифровой экономики позволил уточнить понятие цифровизации объекта или процесса. Ядром цифровой трансформации строительной отрасли являются технологии информационного моделирования, или BIM-технологии (Building Information Model). Анализ научных публикаций по BIM-технологии, проведенный авторами статьи, позволил установить, что на сегодняшний день не сформировано единое определение понятия «BIM». Несмотря на это, в процессе начинающейся цифровой трансформации строительной отрасли в настоящий момент используются следующие технологические решения: BIM, цифровое моделирование городов (City Information Model, CIM), бережливое строительство (Lean Construction, LC) и пр. Более интенсивная реализация указанных решений может послужить совершенствованию процесса цифровой трансформации строительной отрасли, что приведет к созданию отраслевой цифровой экосистемы. В процессе ее функционирования будет осуществляться цифровое взаимодействие всех участников инвестиционно-строительных проектов в условиях облачной информационно-проектировочной среды.

Ключевые слова: цифровая трансформация строительной отрасли, цифровые технологии, облачная информационно-проектировочная среда, BIM-технология, цифровая экосистема.

Mironova L. I.¹, Fomin N. I.², Vinokurov D. S.³, Ogorodnikova S. S.⁴

^{1, 2, 3, 4} Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

e-mail: ¹ mirmila@mail.ru, ² nnimoff@mail.ru, ³ daniel.vinokurov.1999@mail.ru,

⁴ sveta.ogorodnikova.999@mail.ru

MODERN DIGITAL TECHNOLOGIES AND THE POSSIBILITY OF THEIR APPLICATION IN THE PROCESS OF CONSTRUCTION INDUSTRY DIGITAL TRANSFORMATION

Abstract. The purpose of the article: based on a theoretical analysis of existing digital technologies, such as: big data, artificial intelligence, machine learning, neural networks, human-machine interface, virtual reality, the Internet of things, robotization, etc., to show the direction of their application in the digital transformation of the construction industry, which determines the practical significance of the study. An analysis of the historical and technological aspects of the formation of the digital economy made it possible to clarify the concept of digitalization of an object or process. The core of the digital transformation of the construction industry is information modeling technologies, or BIM technologies (Building Information Model). The analysis of scientific publications on BIM technology, carried out by the authors of the article, made it possible to establish that to date a single definition of the concept of "BIM" has not been formed. Despite this, in the process of the emerging digital transformation of the construction industry, the following technological solutions are currently used: BIM, digital city modeling (City Information Model, CIM), lean construction (Lean Construction, LC), etc. More intensive implementation of these solutions can serve improving the process of digital transformation of the construction industry, which will lead to the creation of an industry digital ecosystem. In the process of its functioning, digital interaction of all participants in investment and construction projects will be carried out in the conditions of a cloud information and design environment

Keywords: digital transformation of the construction industry, digital technologies, cloud information and design environment, BIM technology, digital ecosystem.

1. Введение

Анализ экономической ситуации в мире в историческом аспекте позволили констатировать, что в эпоху индустриальной экономики рост производства характеризовался увеличением физического размера предприятия, ростом количества оборудования, его мощностью, расширением штата сотрудников, значительными финансовыми затратами.

В настоящее время мир вступает в эпоху постиндустриальной цифровой экономики, которая в корне меняет ситуацию, характеризующуюся следующими новыми объективными чертами:

- основным неиссякаемым ресурсом является информация;
- онлайн-продажи осуществляются в неограниченном пространстве;
- успешно конкурировать на рынке может и небольшая компания;
- один и тот же физический ресурс может использоваться бесконечное количество раз для предоставления различных услуг;
- объем операций ограничен только размером Интернета;
- главным ориентиром в бизнесе является клиент.

Начиная с 1994 г. цифровая экономика развивалась только за счет электронной торговли и услуг, но теперь она охватывает практически все сферы жизни: розничная торговля, транспорт, финансовые услуги,

производство, образование, здравоохранение, СМИ и пр.

При этом уровень предоставляемых услуг стал значительно более сложным, в нем сочетаются ранее разрозненные технологии, создаются совершенно новые подходы к управлению производственными процессами и окружающей средой [1].

Анализ различных публикаций, в том числе и сетевых, позволил конкретизировать понятие «цифровая экономика», которая на современном этапе представляет собой результат трансформации новых технологий общего назначения в области информации и коммуникации, что оказало существенное влияние на все секторы экономики и социальной деятельности [2]. Это имеет последствия далеко за пределами информационных и коммуникационных технологий. Кроме того, интернет расширяет права и возможности людей в новых направлениях, давая возможность создавать и делиться своими идеями, порождая новое содержание, новые предприятия и рынки.

Проведенный анализ исторического и технологического аспектов становления цифровой экономики позволил уточнить понятие *цифровизации объекта или процесса*, под которым будем понимать *трансформацию данных об объекте или процессе из аналоговой формы в цифровую с использованием цифровых технологий с последующим автоматизированным анализом цифровых данных и принятием оптимального в определенном смысле управленческого решения для улучшения производства или бизнеса*.

Другими словами, можно сказать, что в ходе процесса цифровизации происходит внедрение цифровых технологий в различные сферы жизни и деятельности человека с целью повышения качества жизни и развития экономики. Это помогает выполнять

рутинные задачи и принимать решения без вмешательства человека. Примерами цифровизации являются умные дома, роботы на заводах, беспилотные транспортные средства и пр. Цель цифровизации заключается в автоматизации процессов перехода информации об объекте или процессе из аналоговой формы в цифровую форму, которая проще анализируется, и которая позволяет на основе анализа получить более точное решение, которое направлено на улучшение производства или бизнеса.

Все вышесказанное обосновывает *актуальность* темы представляемой статьи.

2. Результаты и обсуждение

Прежде, чем детально рассмотреть *основные цифровые технологии*, имеющие место в современном мире, дадим определение этому понятию. *Цифровая технология (ЦТ)* – это технология, использующая электронно-вычислительную технику для записи кодовых импульсов в определенной последовательности и с определенной частотой [3].

Рассмотрим наиболее распространенные в настоящее время *цифровые технологии*.

Цифровая технология «Большие данные» (англ. Big Data) – это современная технология, связанная с обработкой крупных массивов данных, объем которых постоянно увеличиваются. Эта технология находит широкое применение в электронной коммерции, а также в работе крупных промышленных компаний и информационных корпораций. Для обеспечения работы Big Data создаются специализированные алгоритмы, программные средства и даже специальные машины. Примерами Big Data являются:

- данные сейсмологических станций, собираемые по всей Земле;
- база пользовательских аккаунтов Facebook;

- геолокационная информация всех фотографий, выложенных на текущий момент в Instagram;
- базы данных операторов мобильной связи и т. п. [4].

Цифровая технология «Искусственный интеллект» (ИИ, англ. artificial intelligence, AI) – это технология, основанная на применении искусственной информационной системы (программная реализация), которая имитирует процесс решения человеком сложных задач его практической деятельности. При этом используются программно-аппаратные средства, которые позволяют на основе применения знаний осуществлять решение неформализованных творческих задач, в том числе моделировать некоторые аспекты человеческой деятельности, включая процесс мышления. В рамках реализации технологии ИИ диалог пользователя с компьютером происходит на естественном для человека языке. Кроме этого, система искусственного интеллекта обеспечивает автоматизацию поведения роботов и робототехнических систем. *Искусственный интеллект* – это направление современных научных исследований, сопровождающих и обуславливающих создание самих систем ИИ, разработанных на базе электронно-вычислительной, микропроцессорной техники и предназначенных для восприятия, обработки, хранения информации, а также для формирования решений по целесообразному поведению в ситуациях, моделирующих состояние различных систем (например, природы, общества). *Искусственный интеллект* понимают еще как моделирование некоторых функций человеческого мозга на основе реализации возможностей информационных технологий [5].

Цифровая технология «Машинное обучение» (англ. Machine learning) – это технология, которая позволяет на

основе известных данных модели прогнозировать неизвестные. Достаточное распространение получили такие задачи машинного обучения:

- регрессионная задача, решение которой позволяет на основании известных данных о продажах в прошлом спрогнозировать будущие объемы продаж;
- задача классификации, решение которой позволяет предсказать, к какому из известных классов относится объект;
- задача кластеризации, решение которой позволяет разделить большое множество объектов на кластеры, внутри которых объекты похожи в определенном смысле между собой;
- задача поиска аномалий, решение которой позволяет находить редкие, необычные объекты, существенно отличающиеся от основной массы [4].

Цифровая технология «Нейронные сети» (англ. Neural networks) – это технология, основанная на алгоритме, моделирующем процессы головного мозга. В данном алгоритме реализован нелинейный метод поиска решений, который обладает высокой скоростью вычислений и способен обрабатывать сложные данные с большим количеством отличающихся признаков.

В зависимости от области применения нейросеть можно трактовать по-разному. С точки зрения машинного обучения нейронная сеть представляет собой метод распознавания образов. С математической точки зрения – это многопараметрическая задача. С точки зрения кибернетики – модель адаптивного управления робототехникой. Для искусственного интеллекта нейросеть является основополагающим составляющим для моделирования естественного интеллекта с помощью вычислительных алгоритмов [4].

Цифровая технология «Человеко-машинные интерфейсы», ЧМИ (англ. Human-machine interfaces, HMI) – технология для обеспечения взаимодействия между оператором и оборудованием, которая дает возможность оператору управлять оборудованием и контролировать процесс его функционирования. Создание систем человеко-машинного интерфейса связано с понятиями эргономика и юзабилити (пер. с англ. «понятно, удобно, комфортно»).

Основная цель человеко-машинного интерфейса заключается в том, чтобы дать возможность пользователям взаимодействовать с процессом, выдавать предупреждения оператору, когда что-то пошло не так в функционировании технологического и производственного оборудования. Кроме того, необходимо формировать уведомления оператору о том, что действительно важно и критично в данной ситуации [4].

Цифровая технология «Виртуальная реальность», ВР (англ. Virtual Reality, VR) – это технология неконтактного информационного взаимодействия, реализующая с помощью комплексных мультимедиа-операционных сред иллюзию непосредственного вхождения и присутствия в реальном времени в стереоскопически представленном «экранном мире» («виртуальном мире») при обеспечении тактильных ощущений, при взаимодействии пользователя с объектами виртуального мира. Эта технология породила метод, позволяющий пользователям экранными моделями оперировать непосредственно в реальном времени в реальном трехмерном пространстве, генерируемом специально разработанными программно-аппаратными средствами. *Системы «Виртуальная реальность»*, реализующие эту технологию, обеспечивают возможность стать участником

действий в абстрактных пространствах, в которых можно задать как виртуальные условия информационного взаимодействия, так и виртуальные объекты, подчиняющиеся этим условиям. При этом может быть создана сколь угодно разнообразная информационно емкая инфраструктура «виртуального мира» и вполне реально осязаемое тактильное взаимодействие, ограниченное уровнем периферийных устройств самой системы «Виртуальная реальность». Кроме того, технология виртуального мира решает проблему удаленного интерфейса между человеком и компьютером. *Базовыми компонентами типичной системы «Виртуальная реальность»* являются:

- перечни и списки с перечислением и описанием объектов, формирующих виртуальный мир, в подсистеме создания и управления объектами;
- подсистема, распознающая и оценивающая состояние объектов из перечней и непрерывно создающая картину «местоположения» пользователя относительно объектов виртуального мира;
- головной установочный дисплей (очки-телемониторы), в котором непрерывно представляются изменяющиеся картины «событий» виртуального мира;
- устройство с ручным управлением, реализованное в виде «информационной перчатки» или «спей-болл», определяющее направление «перемещения» пользователя относительно объектов виртуального мира;
- устройство создания и передачи звука [5].

Цифровая технология «Интернет вещей» (англ. Internet of Things, IoT) – это технология, основанная на концепции вычислительной сети физических предметов («вещей»), оснащенных встроенными датчиками для взаимодействия друг с другом или с внешней средой. Интернет вещей – это не просто множество различных

приборов и датчиков, объединенных между собой проводными и беспроводными каналами связи и подключенных к сети Интернет, а более тесная интеграция реального и виртуального миров, в котором общение производится между людьми, устройствами и внешней средой [4].

Цифровая технология «Роботизация» (англ. *Robotization*) – это технология, основанная на использовании программного обеспечения с искусственным интеллектом (ИИ) и возможностями машинного обучения для обработки повторяющихся задач большого объема, для решения которых ранее требовались люди. Данный процесс следует рассматривать в качестве компонента автоматизации производства, когда человеческие мощности заменяются роботизированными системами в промышленных масштабах. Чаще всего на крупных предприятиях стараются использовать универсальных роботов, которые могут позитивно повлиять на работу всего комплекса в целом [4].

Применение цифровых технологий в различных отраслях экономики позволит осуществить процесс *цифровой трансформации экономики*, под которым будем понимать качественные изменения в бизнес-процессах или способах осуществления экономической деятельности (бизнес-моделях) в результате внедрения цифровых технологий, приводящих к значительным социально-экономическим эффектам [6].

В настоящее время часть рассмотренных цифровых технологий находит применение в строительной отрасли. «Ядром» цифровой трансформации отрасли являются технологии информационного моделирования, или BIM-технологии (Building Information Model), начало внедрения которых приходится на 2000-е годы. К сегодняшнему дню это вполне существенный инструмент

цифровизации строительного производства.

В настоящий момент пока не сформировано единое определение понятия «BIM».

Так согласно данным на ресурсе открытой энциклопедии Wikipedia.org под информационным моделированием здания понимается подход к возведению, оснащению, обеспечению эксплуатации и ремонту здания (к управлению жизненным циклом объекта), который предполагает сбор и комплексную обработку в процессе проектирования всей архитектурно-конструкторской, технологической, экономической и иной информации о здании со всеми ее взаимосвязями и зависимостями, когда здание и всё, что имеет к нему отношение, рассматривается как единый объект [7].

В статье Дронова Д. С., Киметовой Н. Р., Ткаченко В. П. дана такая характеристика BIM: «Технология BIM» – это современный подход к проектированию-строительству-эксплуатации. Она позволяет объединить различные программные продукты и инструменты, что позволяет проводить моделирование значительно дешевле, упрощает процессы визуализации будущего объекта. Технологии BIM позволяют значительно упростить выбор оптимального решения благодаря возможности наглядно визуализировать системы и все элементы проектируемого здания в формате 3D, приводить их в точное соответствие с требованиями действующих стандартов, производить расчет разных вариантов компоновки и анализ эксплуатационных характеристик будущего объекта [8].

В своей работе Талапов В. В. определяет цифровую технологию «Информационное моделирование» как совокупность всей имеющейся числовой информации об объекте, организованную и управляемую нужным образом, используемую на протяжении всего жизненного цикла

объекта: на стадии проектирования, строительства, эксплуатации и даже сноса [9].

В основе концепции BIM он выделяет следующие *принципы* информационного подхода к проектированию объекта: трехмерное моделирование; автоматическое создание графических и текстовых разделов проектной документации; набор атрибутивных данных, соответствующий объекту; интеллектуальная параметризация объектов; распределение процесса строительства по временным этапам и т. п.

Практическое применение информационной модели здания существенно облегчает работу с проектируемым объектом. Прежде всего, виртуальная модель позволяет рассчитать, состыковать, собрать воедино все создаваемые компоненты и системы здания и согласовать с соответствующими специалистами и организациями. Это дает возможность отслеживать внутренние нестыковки (коллизии) составных частей объекта и смежных разделов.

В сравнении с традиционными системами компьютерного проектирования, разрабатывающих геометрические образы, результатом информационного моделирования является объектно-ориентированная цифровая модель всего сооружения, а также процесса организации его строительства [9].

На сегодняшний день во многих странах мира в строительстве активно внедряются технологии информационного моделирования. Масштаб внедрения BIM объясняется, прежде всего, выгодами от применения этой технологии. Эти выгоды приобретаются на различных этапах реализации проекта и различных уровнях (на уровне отдельного предприятия, отрасли и государства в целом). К преимуществам BIM-технологий относятся сокращение

сроков ввода объекта и финансовых издержек на его строительство, централизованное хранение всех данных по конструктивным элементам с привязкой к ним документации в едином информационном ресурсе, автоматическое изменение данных при изменении модели.

В России цифровая трансформация строительной отрасли в настоящий момент опирается на следующие технологические решения.

1. BIM — это не просто компьютерная 3D-модель здания, пришедшая на смену двумерным бумажным чертежам. Помимо «геометрии», BIM интегрирует множество слоев информации в разрезе элементов объекта, в том числе об используемых материалах, спецификациях, стоимости, плане-графике строительных работ, функциональных и эксплуатационных характеристиках и даже условиях окружающей среды [Autodesk, 2021].

При этом изменение какого-либо из параметров здания влечет за собой автоматическое изменение связанных с ним показателей и объектов.

BIM позволяет передавать виртуальную информационную модель от команды разработчиков генеральному подрядчику и субподрядчикам, а затем владельцам или операторам здания.

2. Цифровое моделирование городов (City Information Modeling, CIM) — сравнительно новый тренд, который появился благодаря объединению BIM, GIS (геоинформационных систем) с цифровыми двойниками на базе Интернета вещей, а также совершенствованию технологий оцифровки местности и городских объектов с помощью лазерного, ультразвукового сканирования [НИУ ВШЭ, ДОМ.РФ, 2021].

CIM (или цифровой двойник города) содержит пространственные и тематические данные. Первые описывают физическую структуру

города и формируют его 3D-модель, включая цифровую модель местности, САД- или BIM-модели зданий, инфраструктуры, инженерных систем и т.д. Тематические данные охватывают социальные, экономические и экологические параметры территории — данные переписи населения, сведения о транспортных потоках, ежедневных перемещениях жителей по данным сотовых операторов, реестры объектов, техническую информацию и пр.

3. Бережливое строительство (Lean Construction, LC) — одно из направлений повышения эффективности управления строительными проектами, что достигается, в том числе, посредством сбора и максимального использования полезной информации о проектах (сегодня собирается лишь 5% проектных данных), а также применения таких методов, как поставки «точно в срок», «последний планировщик» (Last Planner System) и др. [Lean Construction Institute, 2021].

Развитие цифровых технологий содействует реализации принципов LC [BCG, 2018]. Так, с помощью компьютерного зрения, Интернета вещей и носимых устройств можно следить за наличием материалов, состоянием оборудования и действиями рабочих в режиме онлайн. Искусственный интеллект дает возможность оценивать эффективность, качество и безопасность работ, выявлять потенциальные риски на стройплощадке. Широкое применение получают облачные цифровые решения для совместной работы в режиме реального времени и управления строительными проектами, доступные через мобильные приложения или со специальных планшетов. Они создают единую среду взаимодействия всех участников (включая архитекторов, проектировщиков, инженеров, прорабов, мастеров, поставщиков и подрядчиков), возможность

распределения и мониторинга исполнения задач на стройплощадке, обмена документацией, размещения отчетности о ходе работ (включая фотографии), совместного редактирования документов, формирования планов-графиков и др. [Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы, 2020].

4. Цифровизация затрагивает непосредственно работы на стройплощадке: автоматизируются или роботизируются рутинные или физически тяжелые операции, например, сварка, установка и скрепление арматуры, подъем и перемещение грузов, отделочные работы и др. Тестируются роботизированные комплексы для укладки кирпичей [Construction Executive, 2021].

Внедряется беспилотная тяжелая строительная техника. С помощью дронов осуществляется мониторинг хода строительных работ.

3D-печать как перспективный в долгосрочном периоде метод возведения зданий также основывается на цифровых технологиях. Трансформируется индустриальное, или модульное, домостроение. Все более широко применяется принцип DIMC (Designing for Industrialized Methods of Construction) — дизайн для индустриального производства, в рамках которого в проект изначально закладываются возможности использования элементов (модулей), изготовленных на цифровых фабриках непосредственно по информационной модели здания.

5. Примеры новых бизнес-моделей и изменений в бизнес-процессах:

- BIM 5D и выше в сочетании с DIMC и цифровыми фабриками – бесшовное роботизированное производство элементов (модулей) здания непосредственно по его информационной модели, данным о компонентах, материалах и их стоимости.

- Бережливое строительство на основе ИИ и обработки данных обо всей цепочке поставок, логистике, производстве материалов и комплектующих и процессах непосредственно на стройплощадке.

3. Заключение

Применение цифровых технологий в строительной отрасли, до настоящего времени являющейся наименее «оцифрованной», позволит начать процесс её *цифровой трансформации*, которая будет заключаться в перестройке управления хозяйственной деятельностью и ресурсами в строительстве, включающее оцифрованную (переведенную в цифровой вид, пригодный для записи на электронные носители) систему производства и реализацию строительной продукции, которая, в свою очередь, предусматривает оцифровку внешних взаимосвязей (кооперационных цепочек) и внутренних бизнес-процессов в каждой строительной компании.

Залогом этого является внедрение: BIM, CIM, цифровых двойников, слои данных, бережливое строительство, облачные решения для совместной работы, роботизация, дроны и беспилотная техника, префабрикация и цифровые фабрики (префабрикация — способ быстрой постройки или сборки из заранее изготовленных материалов), DIMS - цифровая трансформация охватывает все этапы жизненного цикла объектов строительства: планирование, проектирование, возведение, эксплуатацию и снос.

Проведенный в статье теоретический анализ цифровых технологий позволяет надеяться, что в ходе развития и совершенствования процесса цифровой трансформации строительной отрасли в недалеком будущем будет создана *отраслевая цифровая экосистема* [10], которая должна представлять собой

многостороннюю цифровую платформу, для которой характерно следующее:

- все элементы системы присутствуют одновременно в виде физических объектов, продуктов и процессов, а также в виде их цифровых копий (математических моделей) [11];
- все физические объекты, продукты, процессы за счет наличия цифровой копии и элемента «подключённости» становятся частью интегрированной ИТ-системы;
- через наличие цифровых копий (математических моделей) и будучи частью единой информационной системы все элементы системы непрерывно взаимодействуют между собой в режиме, близком к реальному времени, моделируют реальные процессы и прогнозируемые состояния и обеспечивают постоянную самооптимизацию всей системы [10].

В процессе функционирования отраслевой экосистемы осуществляется *цифровое взаимодействие* как цифровая форма организации взаимодействий между отраслевыми поставщиками и потребителями с целью минимизации транзакционных издержек (например, при поиске партнеров, товаров, услуг, организации платежей, заключении контрактов, контроле исполнения договоренностей и т. п., обеспечиваемая специальной платформой [12].

В рамках функционирования цифровой экосистемы строительной отрасли *цифровое взаимодействие* участников инвестиционно-строительных проектов должно перейти на новый, цифровой уровень, обеспечиваемый облачной информационно-проектировочной средой [13].

Список используемых источников

1. Куприяновский В. П., Снягов С. А., Намиот Д. Е., Бубнов П. М., Куприяновская Ю. В. Новая пятилетка BIM – инфраструктура и умные

города // *International Journal of Open Information Technologies*. 2016. Т. 4. №. 8. С. 20 – 35.

2. Open design / URL: <https://www.definitions.net/definition/open+design> (дата обращения: 15.08.2021).

3. *Травуш В. И.* Цифровые технологии в строительстве // *Строительные науки*. 2018. № 3. С. 107 – 117.

4. *Аль-Махфад М. А. А.* Проблемы цифровизации строительной отрасли в России: магистерская диссертация // Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. Екатеринбург, 2020. 92 с.

5. *Роберт И. В.* Теория и методика информатизации образования: психолого-педагогический и технологический аспекты // М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2014. 398 с.

6. Цифровая трансформация отраслей: стартовые условия и приоритеты. Доклад НИУ ВШЭ// URL: <https://conf.hse.ru/mirror/pubs/share/463148459.pdf> (дата обращения: 06.03.2022).

7. BIM – Википедия [Электронный ресурс] // Википедия: свободная энциклопедия. 2022. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/BIM> (дата обращения: 18.03.2022).

8. *Дронов Д. С., Киметова Н. Р., Ткаченко В. П.* Проблемы внедрения BIM – технологий в России // *Синергия Наук*. 2017. № 10. С. 529-549. URL: <http://synergy-journal.ru/archive/article0417> (дата обращения: 18.03.2022).

9. *Талапов В. В.* Технология BIM. Суть и особенности внедрения информационного моделирования зданий // ДМК-Пресс. 2015. 410 с.

10. *Акаткин Ю. М., Карпов О. Э., Конявский В. А., Ясиновская Е. Д.* Цифровая экономика: концептуальная архитектура экосистемы цифровой отрасли // *Бизнес-информатика*. 2017.

11. *Ветров С. А., Конюшевский Д. В.* Цифровой двойник – воплощение антиутопии // *Вестник высшей школы*. 2019. № 5. С. 69 – 72.

12. *Пискунов А. И., Глезман Л. В.* Развитие промышленных предприятий в условиях становления цифровой экономики // *Креативная экономика*. 2019. Т. 13. № 3. С. 471 – 482.

13. *Миронова Л. И., Вилисова А. Д.* Облачная информационно-проектировочная среда как часть цифровой экосистемы в строительстве // *Педагогическая информатика*. 2021. № 4. С. 3 – 8.

References

1. Kupriyanovsky V.P., Sinyagov S.A., Namiot D.E., Bubnov P.M., Kupriyanovskaya Yu.V. (2016). Novaya pyatiletka BIM – infrastruktura i

umnyye goroda [The new five-year plan for BIM - infrastructure and smart cities] // *International Journal of Open Information Technologies*. 8. Vol. 4. 20 - 35.

2. Open design (2021). URL: <https://www.definitions.net/definition/open+design>. (In English).

3. *Travush V.I.* (2018). Tsifrovyye tekhnologii v stroitel'stve [Digital technologies in construction] // *Building Sciences*. 3. 107 – 117. (In Russian).

4. *Al-Mahfadi M.A.A.* (2020). *Problemy tsifrovizatsii stroitel'noy otrasli v Rossii: masterskaya dissertatsiya* [Problems of digitalization of the construction industry in Russia: master's thesis] Yekaterinburg: Ural Federal University (In Russian).

5. *Robert I.V.* (2014). *Teoriya i metodika informatizatsii obrazovaniya: psikhologo-pedagogicheskiy i tekhnologicheskiy aspekty* [Theory and methodology of informatization of education: psychological, pedagogical and technological aspects]. M.: BINOM. Knowledge Lab. (In Russian).

6. Digital transformation of industries: starting conditions and priorities. HSE report (2022). URL: <https://conf.hse.ru/mirror/pubs/share/463148459.pdf> (In Russian).

7. BIM – Wikipedia. Wikipedia: the free encyclopedia. (2022). URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/BIM>.

8. *Dronov D.S., Kimetova N.R., Tkachenkova V.P.* (2017). Problems of implementation of BIM-technologies in Russia // *Synergy of Sciences*. 10. 529-549. URL: <http://synergy-journal.ru/archive/article0417> (In Russian).

9. *Talapov V.* (2015). *Tekhnologiya BIM. Sut' i osobennosti vnedreniya informatsionnogo modelirovaniya zdaniy* [BIM technology. The essence and features of the implementation of building information modeling]. M.: DMK-Press (In Russian).

10. *Akatkin Yu.M., Karpov O.E., Konyavsky V.A., Yasinovskaya E.D.* (2017) Tsifrovaya ekonomika: kontseptual'naya arkhitektura ekosistemy tsifrovoy otrasli [Digital Economy: Conceptual Architecture of the Digital Industry Ecosystem] // *Business Informatics*. 4 (42). 17 – 28 (In Russian).

11. *Vetrov S.A., Konishevsky D.V.* (2019). Tsifrovoy dvoynik – voploshcheniye antiutopii [The digital twin is the embodiment of dystopia] // *Bulletin of Higher School*. 5. 69 – 72 (In Russian)

12. *Piskunov A.I., Glezman L.V.* (2019). Razvitiye promyshlennykh predpriyatiy v usloviyakh stanovleniya tsifrovoy ekonomiki [Development of industrial enterprises in the context of the formation of the digital economy] // *Creative Economy*. 3.V. 13. 471 – 482 (In Russian).

13. Mironova L.I., Vilisova A.D. (2021).
Oblachnaya informatsionno-proyektirovchnaya
sreda kak chast' tsifrovoy ekosistemy v stroitel'stve

[Cloud information and design environment as part
of the digital ecosystem in construction] //
Pedagogical informatics. 4. 3 – 8 (In Russian).

TABLE OF CONTENTS

INDUSTRIAL AND CIVIL ENGINEERING AND ECONOMICS

Mostovskikh D. S., Belyaeva Z. V.

Calculating Fire Resistance of Non-Standard Cross-Sections of Elements of Reinforced Concrete Structures Using the ANSYS Software Complex 5

Borisov N. S.

Calculation of Soil Pressure on Shoring of Excavation..... 20

Almuslehi O. F., Fomin N. I., Rutkauskas T. K.

Strengthening of Reinforced Concrete Beams in A Damaged Building Using Carbon Fiber Materials..... 30

CONSTRUCTION MATERIALS

Zalesova P. S., Nikitina N. P.

Innovative Polymer Materials - Identifying the Problem in a Sociological Survey..... 43

DIGITAL TECHNOLOGY IN CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE

Mironova L. I., Fomin N. I., Vinokurov D. S., Ogorodnikova S. S.

Modern Digital Technologies and the Possibility of their Application in the Process of Construction Industry Digital Transformation 55

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО И ЭКОНОМИКА

Мостовских Д. С., Беляева З. В.

Расчет огнестойкости нестандартных сечений элементов железобетонных конструкций с использованием программного комплекса ANSYS..... 5

Борисов Н. С.

Расчет давления грунтов на ограждения..... 20

Альмуслехи О. Ф., Фомин Н. И., Руткаускас Т. К.

Усиление железобетонных балок в поврежденном здании с использованием углеродных материалов..... 30

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Залесова П. С., Никитина Н. П.

Инновационные полимерные материалы - выявление проблемы в социологическом опросе..... 43

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ И АРХИТЕКТУРЕ

Миронова Л. И., Фомин Н. И., Винокуров Д. С., Огородникова С. С.

Современные цифровые технологии и возможность их применения в процессе цифровой трансформации строительной отрасли..... 55

*Russian Journal
of Construction Science
and Technology*

2022, vol. 8, no. 1

*Founded by Ural Federal University
named after the first President
of Russia B. N. Yeltsin
19, Mira st., 620002,
Yekaterinburg, Russia*

*Русский журнал
строительных наук
и технологий*

2022, том 8, № 1

*Учредитель — Уральский федеральный
университет имени первого Президента России
Б. Н. Ельцина
620002, Россия,
Екатеринбург, ул. Мира, 19*

*Редакторы Л. Г. Пастухова,
З. В. Беляева
Верстка С. С. Новиковой
Дизайн обложки Е. П. Шароваровой*

Journal Registration Certificate
EI № FS77-82134 as of 12.10.21

Office S-319, Mira st., 620002,
Yekaterinburg, Russia
E-mail: RJCST@yandex.ru

Свидетельство о регистрации
Эл № ФС77-82134 от 12.10.21

620002, Россия,
Екатеринбург, ул. Мира, 17, С-319
E-mail: RJCST@yandex.ru

