ТОМ 3, №2, 2024 eISSN 2949-1835
РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий

Строительные конструкции, здания и сооружения

Основания и фундаменты, подземные сооружения

Строительные материалы и изделия

Технология и организация строительства

Строительная механика

Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов

Управление жизненным циклом объектов строительства

www.stsg-donstu.ru
DOI 10.23947/2949-1835

Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий

Рецензируемый научно-практический журнал (издается с 2022 года)

eISSN 2949–1835
DOI: 10.23947/2949–1835

Том 3, № 2, 2024

Журнал создан в целях информирования читательской аудитории о новейших достижениях, тенденциях и перспективах в области строительства, архитектуры, градостроительства и смежных научных направлений. Издание является платформой для научно-образовательного сотрудничества российских и иностранных исследователей, вовлеченных в строительную сферу.

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК) по следующим научным специальностям:

2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)
2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки)
2.1.5 – Строительные материалы и изделия (технические науки)
2.1.7 – Технология и организация строительства (технические науки)
2.1.9 – Строительная механика (технические науки)
2.1.13 – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки)
2.1.14 – Управление жизненным циклом объектов строительства (технические науки)

Индексация и архивация:	РИНЦ, CyberLeninka, CrossRef, Internet Archive
Наименование органа, зарегистрировавшего издание	Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 83923 от 16 сентября 2022 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
Учредитель и издатель	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ)
Периодичность	4 выпуска в год
Адрес учредителя и издателя	344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
E-mail	sovtrendstr@gmail.com
Телефон	+7 (863) 2–738–372
Сайт	http://www.stsg-donstu.ru/
Дата выхода в свет	30.06.2024

© Донской государственный технический университет, 2024

Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning

Peer-reviewed scientific and practical journal (published since 2022)

eISSN 2949–1835
DOI: 10.23947/2949–1835

Vol. 3, no. 2, 2024

A peer-reviewed scientific and practical journal designed to inform the readers about the latest advancements, trends and prospects in the field of construction, architecture, urban planning and adjacent scientific fields. The journal serves a platform for scientific and educational cooperation of researchers and scholars engaged in field of construction.

The journal is included in the List of the leading peer-reviewed scientific publications (Higher Attestation Commission under the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation), where basic scientific results of dissertations for the degrees of Doctor and Candidate of Science in scientific specialties and their respective branches of science should be published.

The journal publishes articles in the following fields of science:
– Building Constructions, Buildings and Engineering Structures (Engineering Sciences)
– Footings and Foundations, Subsurface Structures (Engineering Sciences)
– Construction Materials and Products (Engineering Sciences)
– Technology and Organization of Construction (Engineering Sciences)
– Structural Mechanics (Engineering Sciences)
– Urban Planning, Rural Settlements Planning (Engineering Sciences)
– Facilities Life Cycle Management (Engineering Sciences)

Indexing and Archiving:	RISC, CyberLeninka, CrossRef, Internet Archive
Name of the Body that Registered the Publication	Extract from the Register of Registered Mass Media ЭЛ № ФС 77 – 83923 dated September 16, 2022, issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media
Founder and Publisher	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Don State Technical University (DSTU)
Periodicity	4 issues per year
Address of the Founder and Publisher	1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation
E-mail	sovtrendstr@gmail.com
Telephone	+7 (863) 2–738–372
Website	http://www.stsg-donstu.ru/
Date of Publication	30.06.2024

© Don State Technical University, 2024

Редакционная коллегия

Главный редактор, **Маилян Дмитрий Рафаэлович,** доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

заместитель главного редактора, **Щербань Евгений Михайлович**, кандидат технических наук, доцент, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

выпускающий редактор, **Студенникова Светлана Геннадьевна**, начальник отдела публикационной активности, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

ответственный секретарь, **Шевченко Надежда Анатольевна**, начальник отдела научно-технической информации и научных изданий, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Беккиев Мухтар Юсубович, доктор технических наук, профессор, директор Высокогорного Геофизического Института (Нальчик, Российская Федерация);

Ходжаев Аббас Агзамович, доктор технических наук, профессор, начальник отдела контроля учебных программ и учебной литературы Министерства высшего и среднего специального профессионального образования (Ташкент, Республика Узбекистан);

Несветаев Григорий Васильевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Прокопов Альберт Юрьевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Скибин Геннадий Михайлович, доктор технических наук, профессор, Южно-Российский государственный политехнический университет (ЮРГПУ НПИ) имени М.И. Платова (Новочеркасск, Российская Федерация);

Плешко Михаил Степанович, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский технологический университет «Московский институт стали и сплавов» (НИТУ «МИСиС») (Москва, Российская Федерация);

Котляр Владимир Дмитриевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Зайченко Николай Михайлович, доктор технических наук, профессор, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (Макеевка, Российская Федерация);

Адылходжаев Анвар Ишанович, доктор технических наук, профессор, Ташкентский государственный транспортный университет (Ташкент, Республика Узбекистан);

Григорян Вардгес Игитович, доктор технических наук, профессор, руководитель Ассоциации промышленных предприятий Армении (Ереван, Республика Армения);

Байбурин Альберт Халитович, доктор технических наук, профессор, Южно-Уральский государственный университет (ЮУрГУ) (Челябинск, Российская Федерация);

Толкынбаев Темирхан Анапияевич, доктор технических наук, профессор, действительный (иностранный) член Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), первый проректор Таразского университета (Тараз, Казахстан);

Языев Батыр Меретович, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Акимов Павел Алексеевич, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), академик Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН) (Москва, Российская Федерация);

Панасюк Леонид Николаевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Беспалов Вадим Игоревич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Данилина Нина Васильевна, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ) (Москва, Российская Федерация);

Сидоренко Владимир Федорович, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ) (Волгоград, Российская Федерация);

Товмасян Саркис Арисаткакесович, доктор архитектурных наук, доцент, член Палаты архитекторов Армении (Ереван, Республика Армения).

Editorial Board

Editor-in-Chief, **Dmitry R. Mailyan**, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Deputy Chief Editor, **Evgenii V. Shcherban'**, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Executive Editor, **Svetlana S. Studennikova**, Head of the Publication Activity Department, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Executive Secretary, **Nadezhda A. Shevchenko,** Head of the Scientific and Technical Information and Scientific Publications Department, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Mukhtar Yu. Bekkiev, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Director of the High-Mountain Geophysical Institute (Nalchik, Russian Federation);

Abbas A. Khodzhaev, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Head of the Curricula and Educational Literature Control Department, Ministry of Higher and Secondary Vocational Education of the Republic of Uzbekistan (Tashkent, Republic of Uzbekistan);

Grigory V. Nesvetaev, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Albert Yu. Prokopov, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Gennady M. Skibin, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) (Novocherkassk, Russian Federation);

Mikhail S. Pleshko, Dr.Sci. (Engineering), Professor, National University of Science and Technology MISIS (Moscow, Russian Federation);

Vladimir D. Kotlyar, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Nikolai M. Zaichenko, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (Makeevka, Russian Federation);

Anvar I. Adilkhodjaev, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Tashkent State Transport University (Tashkent, Republic of Uzbekistan);

Vardges I. Grigoryan, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Head of the Association of Industrial Enterprises of Armenia (Yerevan, Republic of Armenia);

Albert Kh. Bayburin, Dr.Sci. (Engineering), Professor, South Ural State University (Chelyabinsk, Russian Federation);

Temirkhan A. Tolkynbaev, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Full (Foreign) Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), First Vice-Rector, Taraz University (Taraz, Republic of Kazakhstan);

Batyr M. Yazyev, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Pavel A. Akimov, Dr.Sci. (Engineering), Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS) (Moscow, Russian Federation);

Leonid N. Panasyuk, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Vadim I. Bespalov, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Nina V. Danilina, Dr.Sci. (Engineering), Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU) (Moscow, Russian Federation);

Vladimir F. Sidorenko, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Volgograd State Technical University (VSTU) (Volgograd, Russian Federation);

Sarkis A. Tovmasyan, Dr.Sci. (Architecture), Associate Professor, Member of the Chamber of Architects of the Republic of Armenia (Yerevan, Republic of Armenia).

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

Щуцкий С.В., Лиманцев А.А., Скуратов С.В., Левенец К.В. Оптимизация конструкции карнизного узла рамы из круглых труб 7

Ходжаев А.А., Каримжонов И.С. Современные легкие энергосберегающие наружные каркасно-обшивные стены и возможности их применения в строительстве многоэтажных железобетонных каркасных зданий в Узбекистане 17

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Дежина И.Ю. К вопросу определения изменения влажности при замачивании котлована в лессовых толща***х*** 26

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

Османов С.Г., Иняхин А.Э. Оценка конкурентоспособности способов устройства уширений буровых свай при возведении фундаментов многоэтажных зданий 33

Шисяо У, Шеина С.Г., Белаш В.В. Анализ особенностей строительной отрасли Китая и тенденции ее развития 42

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Зоалкфл Д.А., Тюрина В.С., Чепурненко А.С. Определение температурных напряжений при возведении монолитных толстостенных цилиндрических оболочек 50

CONTENTS

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES

Shchutsky SV, Limantsev AA, Skuratov SV, Levenets KV. Design Optimisation of a Truss-to-Column Connection in a Frame Structure Made of Round Tubes 7

Khodjaev AA, Karimzhonov IS. Modern Lightweight Energy-Saving Frame-Sheathing Exterior Walls and Possibilities of Using Thereof in Construction of the Multi-Storey Reinforced Concrete Frame Buildings in Uzbekistan 17

BASES AND FOUNDATIONS, SUBSURFACE STRUCTURES

Dezhina IYu. About Determination of Moisture Changes during Presoaking an Excavation Pit in Loess Strata 26

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION

Osmanov SG, Inyakhin AE. Evaluating the Competitiveness of the Methods of Bored Cast-in-Place Piles Underreaming when Constructing the Foundations of Multistorey Buildings 33

Wu Shixiao, Sheina SG, Belash VV. Analysis of the Chinese Construction Industry Features and Trends of Development 42

CONSTRUCTION MECHANICS

Zoalkfl DA, Tyurina VS, Chepurnenko AS. Determination of Temperature Stresses during Construction of the Monolithic Thick-Walled Cylindrical Shells 50

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ
BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES

CC BY

Check for updates

УДК 69.07
https://doi.org/10.23947/2949–1835-2024-3-2-7-16

Оригинальное эмпирическое исследование

Оптимизация конструкции карнизного узла рамы из круглых труб

С.В. Щуцкий ✉, **А.А. Лиманцев**, **С.В. Скуратов**, **К.В. Левенец**
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ svpike1@rambler.ru

EDN: INMMMQ

Аннотация

Введение. Статья посвящена оптимизации конструкции карнизного узла рамы, выполненной из круглых труб. Рассмотрена стальная решетчатая рама пролетом 66 м. Ригель рамы в виде фермы передает усилия через жесткий карнизный узел на стойку рамы. В подобных конструкциях максимальные изгибающие моменты воспринимает карнизный узел, регулирование геометрии которого является одной из задач оптимального проектирования. Целью данной работы является создание наиболее рационального конструктивного решения данного узла.

Материалы и методы. В решетчатых рамах с внутренней стороны сходятся, в зависимости от выбранной конструкции, 5–7 элементов, которые испытывают напряжение сжатия. Классические варианты выполнения данного узла приводят к необходимости применения более толстостенных труб, что является причиной перерасхода материала. В ходе исследования были выполнены моделирование и расчет карнизного узла в различных вариантах исполнения. В ходе анализа результатов расчета были определены недостатки рассмотренного карнизного узла рамы.

Результаты исследования. В результате оптимизации конструкции узла был предложен новый вариант, в котором соединение нижнего пояса выполнено при помощи прорезной фасонки. Данное решение позволяет наиболее полно использовать несущую способность сечения нижнего пояса.

Обсуждение и заключение. В результате оптимизации предлагаемая конструкция карнизного узла позволяет снизить металлоемкость при сохранении относительной простоты изготовления. При этом за счет снижения локальных напряжений удается добиться большей прочности и надежности карнизного узла.

Ключевые слова: стальная рама, круглая труба, оптимизация, локальные напряжения, металлоемкость

Для цитирования. Щуцкий С.В., Лиманцев А.А., Скуратов С.В., Левенец К.В. Оптимизация конструкции карнизного узла рамы из круглых труб. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(2):7–16. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-2-7-16

Original Empirical Research

Design Optimisation of a Truss-to-Column Connection in a Frame Structure Made of Round Tubes

Sergei V. Shchutsky ✉, **Aleksei A. Limantsev**, **Sergei V. Skuratov**, **Kristina V. Levenets**
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ svpike1@rambler.ru

Abstract

Introduction. The article investigates the ways to optimise the design of a truss-to-column connection in a frame structure made of round tubes. A steel lattice frame with a span of 66 m has been studied. A spanning member of a frame in the form of a truss transmits loads to a frame column through a rigid truss-to-column connection. In such structures, the maximum bending moments are applied to a truss-to-column connection, thus the problem of regulating its geometry is one of the objectives to be solved within the optimal designing. The aim of this paper is to create the most rational design solution for such a connection.

Materials and Methods. In the lattice frames, depending on the chosen design, 5 to 7 members subject to compression stress converge at its inner side. The conventional variants of executing this connection would require using the heavy

© Щуцкий С.В., Лиманцев А.А., Скуратов С.В., Левенец К.В., 2024

wall tubes which would result in the excess of material consumption. Within the research, modeling and calculation of various configurations of the truss-to-column connection were executed. The analysis of the calculation results revealed the shortcomings of the studied truss-to-column connection in a frame structure.

Results. As a result of the connection design optimisation, a new configuration was suggested, where the connection of a bottom chord was executed by a slotted gusset plate. Such a solution allows for the most complete use of the bearing capacity of the bottom chord cross section.

Discussion and Conclusion. As a result of the optimisation, the proposed design of a truss-to-column connection makes it possible to reduce the metal consumption while maintaining the relative simplicity of manufacture. At the same time, by reducing the local stresses, it is possible to achieve the greater strength and reliability of a truss-to-column connection.

Keywords: steel frame, round tube, optimisation, local stresses, metal consumption

For citation. Shchutsky SV, Limantsev AA, Skuratov SV, Levenets KV. Design Optimisation of a Truss-to-Column Connection in a Frame Structure Made of Round Tubes. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024;3(2):7–16. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-2-7-16

Введение. В процесе проектирования строительной конструкции проектировщик должен стемиться создать наилучшее решение, которое будет отвечать как минимальному расходу материала, так и технологичности изготовления и монтажа, а также надежности конструкции. В связи с этим возникает задача оптимального проектирования [1–4].

Для решения задачи оптимального проектирования удобнее всего использовать метод математического моделирования. Исследование объектов с помощью этого метода позволяет проникнуть в сущность изучаемых объектов и дает возможность решения сложных задач.

В данной статье рассмотрен процесс оптимизации карнизного узла стальной решетчатой рамы с элементами из круглых труб пролетом 66 м (рис. 1). Ригель рамы выполнен в виде арочной фермы, передающей усилия через жесткий карнизный узел на стойку рамы — вертикальную решетчатую конструкцию. Таким образом, аналитическая модель данной конструкции — рама с жестким сопряжением стойки и ригеля. В подобных конструкциях максимальные изгибающие моменты воспринимает карнизный узел, регулирование геометрии которого является одной из задач оптимального проектирования [5, 6].

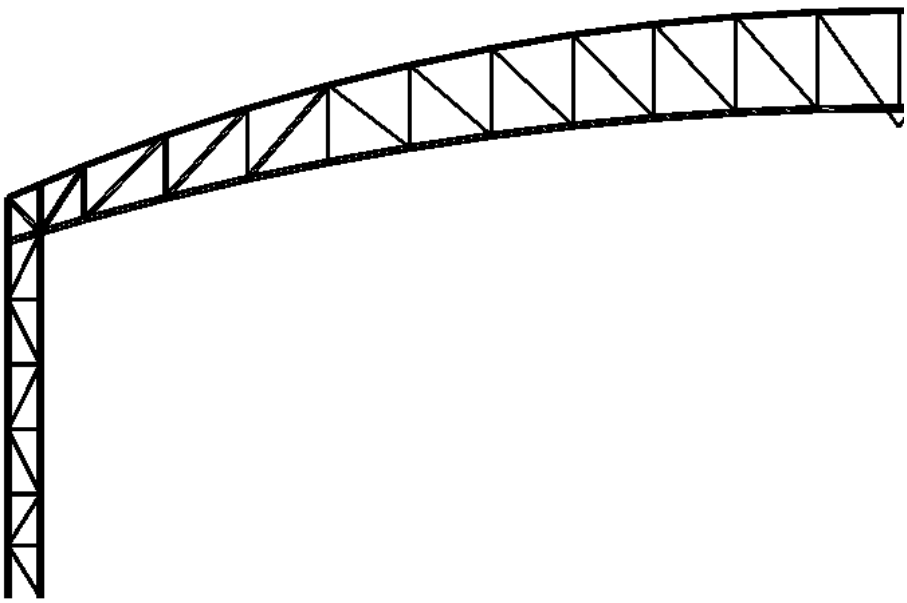


Рис. 1. Полурама рассматриваемой конструкции

Материалы и методы. Существуют три распространенных способа крепления друг к другу элементов трубчатого сечения [7, 8]:

– прорезка элемента с последующим монтажом в прорезь фасонного листового проката, приваренного к основному элементу;

– прессование концов присоединяемой трубы и монтаж на фасонку основного элемента посредством сварки или болтового соединения;

– обрезка присоединяемой трубы по контуру основного элемента с последующей сваркой монтируемых элементов.

https://www.stsg-donstu.ru

Первый способ характеризуется наиболее упрощенным технологическим процессом и позволяет конструировать узлы с продольными усилиями больше 7 тонн [9].

Второй способ технологически сложен и наиболее актуален при конструировании мобильных сооружений с высокой частотой сборки и разборки конструкций [7, 10, 11].

Третий способ наиболее сложен и возможен только при заводском изготовлении конструкций. В отличие от первого и второго способов стыковки третий способ более равномерно распределяет нагрузку от прикрепляемого элемента, не концентрируя ее в зоне примыкания фасонки к основному элементу узла [9, 10]. В результате расчета получаем, что все сходящиеся в рассматриваемом узле элементы испытывают сжимающие усилия в диапазоне от –62 до –1270 кН (рис. 2).

Основные элементы, на которые передаются сжимающие усилия, подвержены влиянию локальных напряжений в местах присоединения фасонок или непосредственно элементов решеток рам и ферм. При достаточной разнице в размерах сечений присоединяемых и основных элементов узла стенки элементов, воспринимающих большие усилия, испытывают локальные моменты, приводящие к продавливанию или выдергиванию стенки элементов [12].

Наибольшее сопротивление локальным напряжениям имеют элементы с наибольшей толщиной стенок. В данном узле такими элементами являются внутренний пояс стойки рамы, нижний пояс ригеля рамы и опорный раскос. Данные элементы могут быть назначены в качестве основных элементов карнизного узла, к которым осуществляется присоединение элементов с меньшей толщиной стенок, воспринимающих меньшие сжимающие усилия.

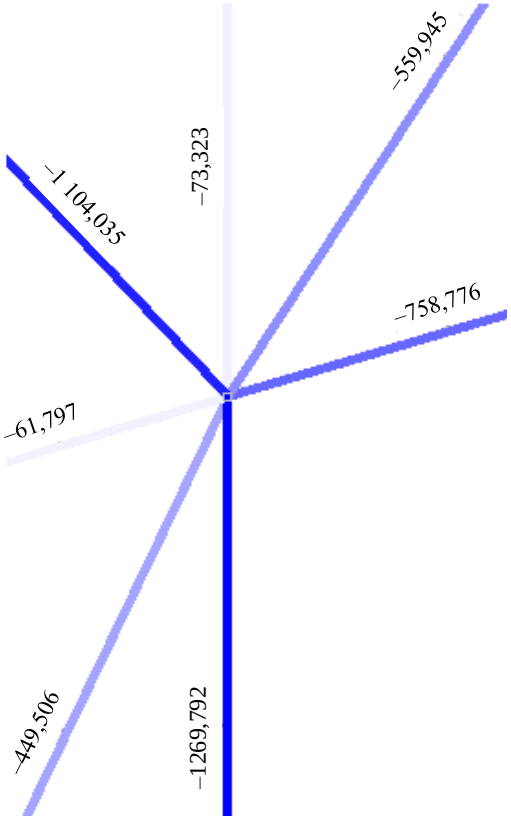


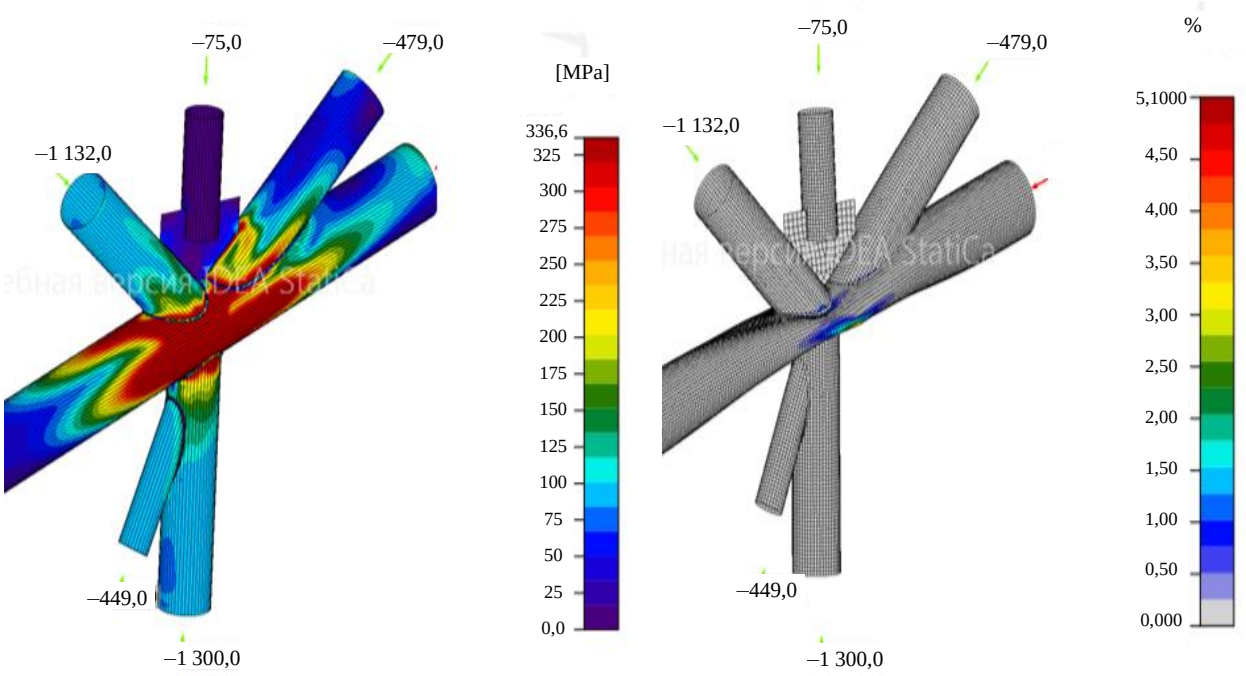
Рис. 2. Усилия в карнизном узле рамы

Карнизный узел смоделирован в программе TeklaStructures с последующим экспортом в среду IdeaStatiCa, в которой реализована возможность нелинейного анализа конструкции по деформированной схеме, наиболее полно отражающей работу конструкции [13–15].

Кончено-элементный анализ узла с учетом нелинейной зависимости «напряжение — деформация» показал, что конструкция узла без усиливающих пластин переходит в пластичную стадию работы вследствие обжатия нижнего пояса примыкающими элементами. Раскосы и внутренний пояс стойки рамы сдавливают пояс таким образом, что его боковые стенки выходят из плоскости приложения нагрузок (рис. 3).

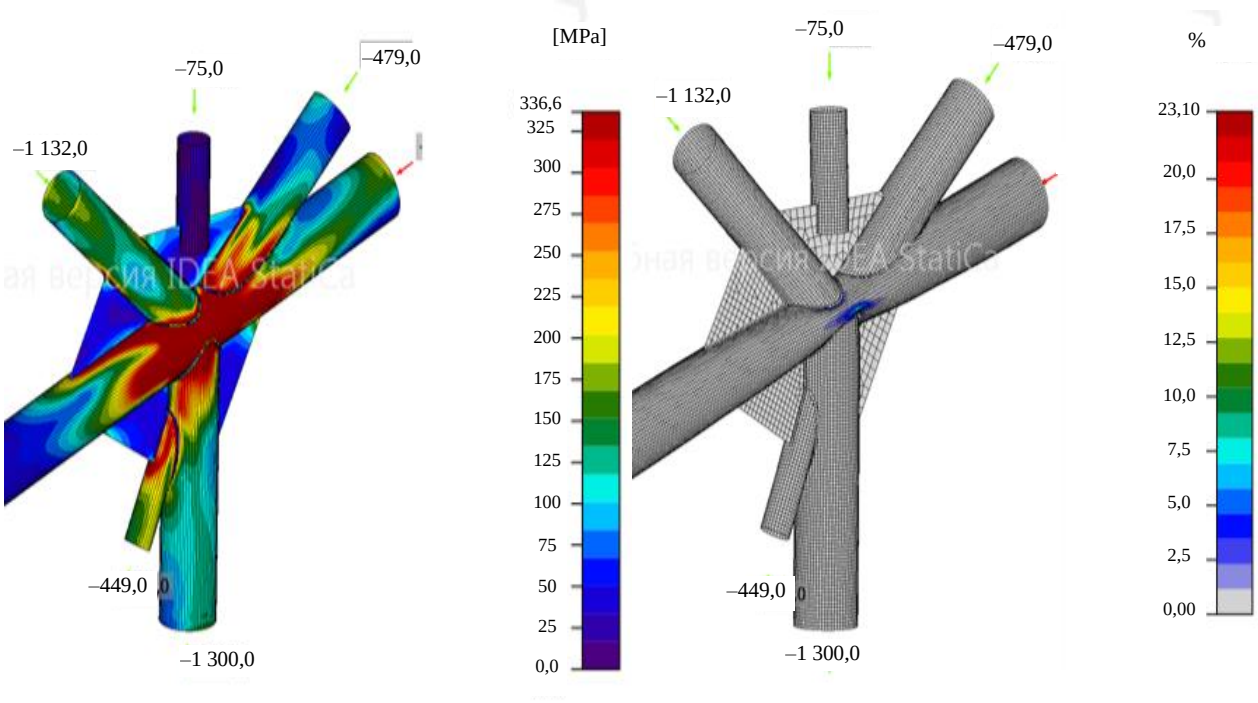
Добавление усиливающих пластин в теории позволяет более равномерно распределить нагрузку от примыкающих элементов к нижнему поясу арки. Монтаж усиливающих пластин удорожает производство конструкции. Согласно таблицам, изложенным в литературе по расчету и проектированию металлических конструкций [11, 16, 17], толщина фасонок при усилиях от 700 до 1 300 кН варьируется от 14 до 16 мм. Согласно

требованию п. 14.1.7а СП 16.13330.2017 катет сварного шва не должен превышать 1,2 толщины стенок свариваемых элементов. При значении длины углового шва на стыке пояса стойки рамы и нижнего пояса ригеля рамы менее 860 мм, которое получается во всех вариантах соединения, требуемый катет шва равен 10 мм. Следовательно, для исполнения узла данным способом необходимо обеспечить минимальную толщину стенок поясов ригеля и стойки рамы, равную 9 мм.



а) *б)*

Рис. 3. Визуализация результатов расчета бесфасонного соединения карнизного узла в ПК IdeaStatiCa:
а — напряжения; *б* — деформация



а) *б)*

Рис. 4. Визуализация результатов расчета карнизного узла с прорезью фасонками в ПК IdeaStatiCa:
а — напряжения; *б* — деформация

https://www.stsg-donstu.ru

При бесфасоночном соединении максимальные напряжения в узле составляют 355,8 МПа (рис. 5).

Проверка элементов и пластин для наихудшего загружения

	Статус	Элемент	Материал	Ry [MPa]	Th\\\ [mm]	Нагрузки	σ [MPa]	ε,pl [%]	$\sigma_{c,Ed}$ [MPa]
>	✗	NP	C345	336,6	9,0	LE1	355,8	9,3	0,0
	✓	R1	C345	336,6	6,0	LE1	339,5	1,4	0,0
	✓	R2	C345	336,6	8,0	LE1	338,8	1,1	0,0
	✗	SO	C345	336,6	9,0	LE1	348,1	5,6	0,0
	✓	S1	C345	336,6	6,0	LE1	79,5	0,0	0,0
	✓	R3	C345	336,6	4,0	LE1	205,8	0,0	0,0
	✓	f1	C345 - 1	317,1	14,0	LE1	122,0	0,0	0,0

Рис. 5. Результаты проверки бесфасоночного соединения карнизного узла в среде IdeaStatiCa (фрагмент программы)

Соединение с прорезью фасонками не снижает в достаточной степени локальные напряжения в зоне примыкания элементов раскосов. Испытываемые напряжения превышают расчетное сопротивление нижнего пояса решетчатой фермы (рис. 6).

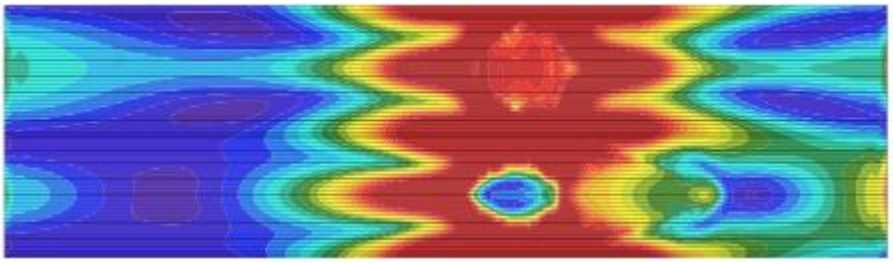
Проверка элементов и пластин для наихудшего загружения

	Статус	Элемент	Материал	Ry [MPa]	Th\\\ [mm]	Нагрузки	σ [MPa]	ε,pl [%]	$\sigma_{c,Ed}$ [MPa]
>	✗	NP	C345	336,6	9,0	LE1	355,9	9,4	0,0
	✓	R1	C345	336,6	6,0	LE1	340,2	1,7	0,0
	✓	R2	C345	336,6	8,0	LE1	338,5	0,9	0,0
	✗	SO	C345	336,6	9,0	LE1	348,5	5,8	0,0
	✓	S1	C345	336,6	6,0	LE1	101,9	0,0	0,0
	✓	R3	C345	336,6	4,0	LE1	336,6	0,0	0,0
	✓	f1	C345 - 1	317,1	14,0	LE1	186,9	0,0	0,0
	✓	УсилПл2	C345 - 1	317,1	16,0	LE1	184,4	0,0	0,0
	✓	УсилПл3	C345 - 1	317,1	16,0	LE1	132,3	0,0	0,0
	✓	УсилПл4	C345 - 1	317,1	16,0	LE1	257,2	0,0	0,0

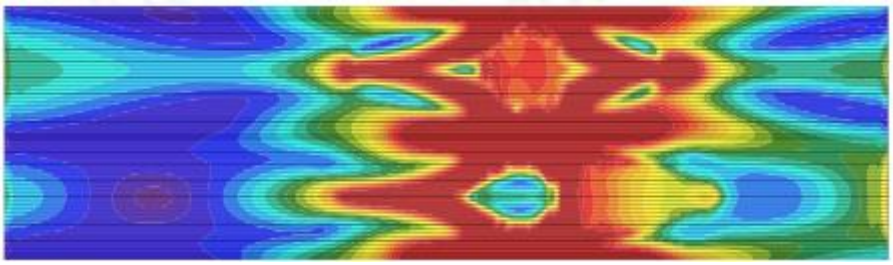
Рис. 6. Результаты проверки соединения с прорезью фасонками карнизного узла в среде IdeaStatiCa (фрагмент программы)

Анализ диаграммы распределения напряжений в нижнем поясе позволяет сделать вывод о том, что при соединении с прорезью фасонками напряжения распределяются более равномерно, однако абсолютное значение максимума локальных напряжений остается неизменным и достигается вокруг контура стыка пояса стойки рамы и пояса ригеля рамы (рис. 7).

Таким образом, реализация карнизного узла, в котором геометрия рамы предполагает использование нижнего пояса решетчатой фермы в качестве основного элемента карнизного узла, невозможна без дополнительного усиления стенок поясов. Удовлетворительных значений локальных напряжений удалось достичь лишь при местном увеличении толщины стенки пояса арки до 16 мм (рис. 8).



а)



б)

Рис. 7. Диаграммы распределения напряжения в нижнем поясе:
а — при бесфасоночном соединении; *б* — при соединении с прорезью фасонками

Проверка элементов и пластин для наихудшего загружения

	Статус	Элемент	Материал	Ry [MPa]	Th\\\ [mm]	Нагрузки	σ [MPa]	ε,pl [%]	$\sigma_{c,Ed}$ [MPa]
>	✓	NP	C345	317,1	16,0	LE1	318,8	0,8	0,0
	✓	R1	C345 - 1	336,6	6,0	LE1	336,8	0,1	0,0
	✓	R2	C345 - 1	336,6	8,0	LE1	337,8	0,6	0,0
	✓	SO	C345	317,1	12,0	LE1	318,4	0,7	0,0
	✓	S1	C345 - 1	336,6	6,0	LE1	107,8	0,0	0,0
	✓	R3	C345 - 1	336,6	4,0	LE1	336,7	0,1	0,0
	✓	f1	C345	317,1	14,0	LE1	105,6	0,0	0,0
	✓	УсилПл2	C345	317,1	16,0	LE1	127,8	0,0	0,0
	✓	УсилПл3	C345	317,1	16,0	LE1	122,1	0,0	0,0
	✓	УсилПл4	C345	317,1	16,0	LE1	207,3	0,0	0,0

Рис. 8. Результаты проверки соединения с прорезью фасонками и с усилением стенок нижнего пояса в 1 варианте карнизного узла в среде IdeaStatiCa (фрагмент программы)

Проблема поверхностной пластичности поясов фермы в карнизном узле, выполненном согласно рис. 3, 4, подробно рассмотрена в работе Wenwei Yang [18].

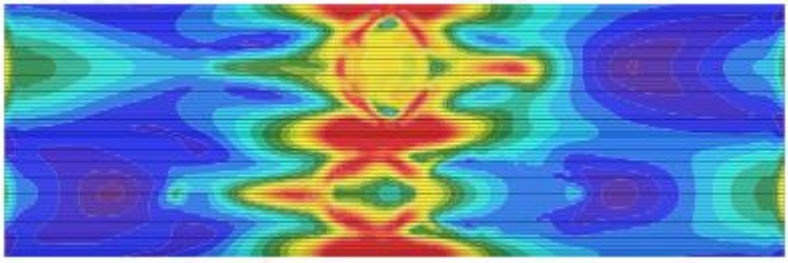


Рис. 9. Диаграмма распределения напряжений в нижнем поясе с усилением пояса

https://www.stsg-donstu.ru

Локальное увеличение толщины пояса на 8 мм в зоне карнизного узла сопряжено со значительным удорожанием конструкции вследствие применения нестандартных решений и сложности изготовления нетипового трубного проката.

Данная проблема решается добавлением подкоса между ригелем и стойкой рамы (рис. 10), перераспределяющего усилия таким образом, чтобы устранить обжатие нижнего пояса в карнизном узле.

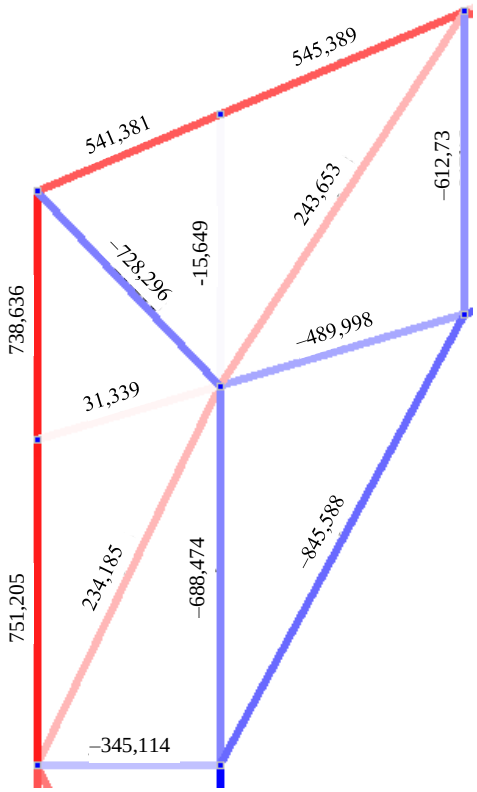
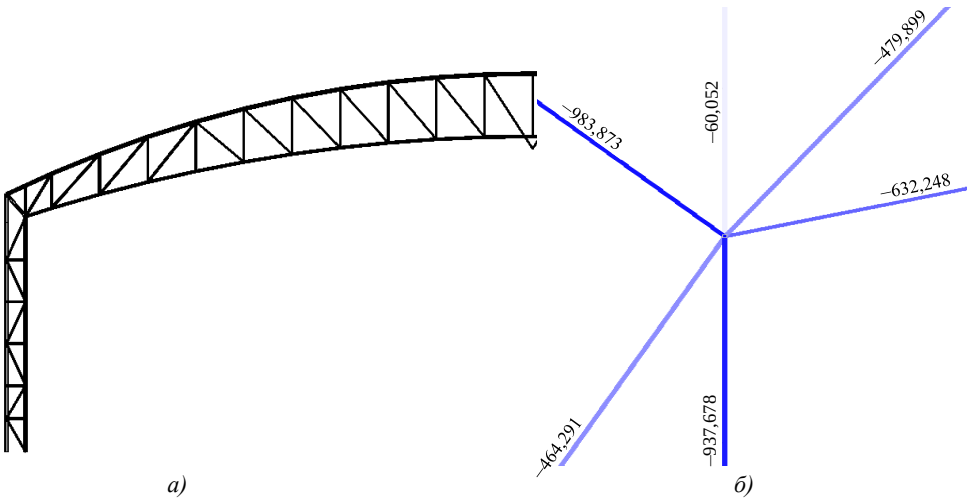


Рис. 10. Перераспределение усилий при добавлении дополнительного подкоса

Следствием добавления дополнительного подкоса является увеличение материалоемкости вариантов конструирования с наибольшими материалозатратами из всех вариантов конструирования.

Результаты исследования. Изменение конструкции рамы, а именно исключение крайнего сегмента нижнего пояса в карнизном узле, приводит к отсутствию обжатия нижнего пояса. Стержень нижнего пояса соединяется в узле с другими стержнями через горизонтальную пластину. Примыкание раскоса стойки рамы осуществлено без смещения по вертикали от узла, что позволяет устранить эксцентриситет в поясе стойки рамы (рис. 11).

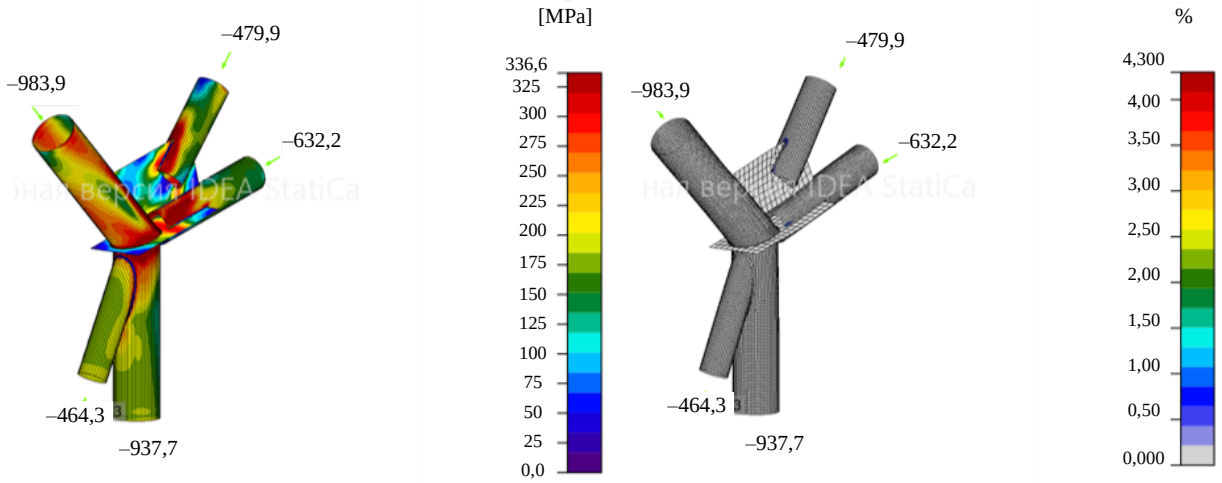


а) *б)*

Рис. 11. Второй вариант конструирования рамы: *а* — схема полурамы; *б* — усилия в стержнях карнизного узла

В предложенном варианте исполнения узла основных элемента два: опорный раскос и внутренний пояс стойки рамы. Сопряжение данных элементов осуществлено таким образом, чтобы образовать выгиб конструкции

по направлению к сжимающей нагрузке от нижнего пояса. Основные элементы соединены через фасонку, расположенную параллельно нижнему поясу. Осуществлена прорезка нижнего пояса на расчетную величину сварного шва. Таким образом, предложенная конструкция карнизного узлового соединения является наиболее оптимальной для рассматриваемой решетчатой рамы.



а) *б)*

Рис. 12. Визуализация результатов расчета карнизного узла четвертого варианта конструирования в ПК IdeaStatiCa: *а* — напряжения; *б* — деформация

Проверка элементов и пластин для наихудшего загружения

	Статус	Элемент	Материал	Ry [MPa]	Th\\\ [mm]	Нагрузки	σ [MPa]	ε,pl [%]	$\sigma_{c,Ed}$ [MPa]
>	✓	NP	C345	336,6	7,0	LE1	343,4	3,3	0,0
	✓	R1	C345	336,6	7,0	LE1	339,5	1,4	0,0
	✓	R2	C345	336,6	6,0	LE1	343,6	3,4	0,0
	✓	SO	C345	336,6	7,0	LE1	337,3	0,3	0,0
	✓	R3	C345	336,6	5,0	LE1	336,6	0,0	0,0
	✓	УсилПл2	C345 - 1	317,1	16,0	LE1	317,2	0,0	0,0
	✓	УсилПл3	C345 - 1	317,1	12,0	LE1	318,0	0,4	0,0

Рис. 13. Результаты проверки соединения в 4 варианте карнизного узла в среде IdeaStatiCa (фрагмент программы)

Обсуждение и заключение. В результате выполненного исследования предложен узел, в котором отсутствует элемент, испытывающий сжимающие усилия, направленные с противоположных сторон. При таком конструктивном решении элементы узла меньше подвержены влиянию локальных напряжений, что приводит к снижению металлоемкости конструкции за счет использования стержней из труб с меньшей толщиной стенки и отсутствию необходимости дополнительного локального усиления.

Список литературы / References

1. Coduto DP, Kitch WA, Man-chu RY. *Foundation design: principle and practices.* Boston Columbus, Indianapolis, etc.: Pearson Education, Inc.; 2016. 960 p. URL: https://istasazeh-co.com/pdf/Foundation-design-principles-and-practices-Donald-P-Coduto.pdf (accessed: 01.04.2024).

2. Кузнецов В.В. (ред.). Справочник проектировщика. Том 3. Москва.: АСВ; 1999. 528 с. URL: https://s.siteapi.org/411667c697289ee.ru/docs/fc7956b158cafcb08994c5b2b10de03502fbd72a.pdf (дата обращения: 18.03.2024).

Kuznetsov VV. (ed.). *Designer's Handbook. Volume 3*. Moscow: ACB; 1999. 528 p. URL: https://s.siteapi.org/411667c697289ee.ru/docs/fc7956b158cafcb08994c5b2b10de03502fbd72a.pdf (accessed: 18.03.2024). (In Russ.).

3. Щуцкий С.В., Скуратов С.В., Лиманцев А.А. Методика проектирования стальных рам переменного сечения из прокатных двутавров. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2022;1(4):4–14. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-4-4-14

Shchutsky SV, Skuratov SV, Limantsev AA. Methodology for Designing the Steel Frames of Variable Cross-Section from Rolled I-Beams. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2022;1(4):4–14. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-4-4-14 (In Russ.).

4. Щуцкий С.В., Коржов С.В., Лиманцев А.А. Исследование работы стальных рам с элементами переменного сечения, образованных путем диагонального роспуска двутавров по ГОСТ Р 57837–2017. *Инженерный вестник Дона*. 2022;(11). URL: https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8034 (дата обращения: 16.03.2024).

Shchutsky SV, Korzhov SV, Limantsev AA. Investigation of the Operation of Steel Frames with Elements of Variable Cross-Section formed by Diagonal Dissolution of I-Beams according to GOST R 57837–2017. *Engineering Journal of Don*. 2022;(11). URL: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_54__11_Shchutsky_Korzhov_Limantsev.pdf_49f5fe6cd9.pdf (accessed: 16.03.2024). (In Russ.).

5. Катюшин В.В. *Здания с каркасами из стальных рам переменного сечения.* Монография. Москва.: АСВ; 2018. 1072 с.

Katyushin VV. *Buildings with Frames Made of Steel Frames of Variable Cross-Section*. Monograph. Moscow: ASV; 2018. 1072 p. (In Russ.).

6. Palmer AC. Optimal Structure Design by Dynamic Programming. *Journal of the Structural Division.* 1968;94(8):1887–1906. https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0002035

7. Киселев Д.Б. *Работа комбинированной арочной системы с учетом геометрической нелинейности и последовательности монтажа.* Дисс. канд. техн. наук. Москва.; 2009. 183 с.

Kiselev DB. *Operation of the Combined Arch System Taking into Account Geometric Nonlinearity and Sequence of Installation*. Cand.Sci. (Engineering) Dissertation. Moscow; 2009. 183 p. (In Russ.).

8. Thornton WA, Holland MV, Aminmansour A, Carter CJ, Cole HA, Davis DB (eds.) *Design Examples. For Use in First Semester Structural Steel Design Classes*. Version 14.0. USA: American Institute of Steel Construction; 2011. 125 p. URL: https://www.aisc.org/globalassets/aisc/university-programs/teaching-aids/first-semester-design-examples.pdf (accessed: 20.03.2024)

9. Nageim HA, MacGinley TJ. *Steel Structures. Practical Design Studies.* Third Edition. CRC Press; 2005. 352 p.

10. Москалев Н.С., Пронозин Я.А. *Металлические конструкции.* Москва.: Издательство Ассоциации строительных вузов; 2010. 344 с.

Moskalev NS, Pronozin YaA. *Metal Structures*. Moscow: Association of Civil Engineering Universities Publishing House; 2010. 344 p. (In Russ.).

11. Запросян А.О., Леонова Д.А., Шкрылев Р.А. Технико-экономическое обоснование унификации элементов металлических стропильных ферм. *Инженерный вестник Дона*. 2021;8 URL: https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2021/7148 (дата обращения: 20.03.2024).

Zaprosyan AO, Leonova DA, Shkrylev RA. Feasibility Study of the Unification of Metal Truss Frame Elements. *Engineering Journal of Don*. 2021;(8) URL: https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2021/7148 (accessed: 20.03.2024). (In Russ.).

12. Москалев Н.С., Пронозин Я.А., Парлашкевич В.С., Корсун Н.Д. *Металлические конструкции, включая сварку.* Москва.: Издательство АСВ; 2014. 352 с.

Moskalev NS, Pronozin YaA, Parlashkevich VS, Korsun ND. *Metal Structures, Including Welding*. Moscow: ASV Publishing House; 2014. 352 p. (In Russ.).

13. Gillman A, Fuchi K, Buskohl PR. Truss-based Nonlinear Mechanical Analysis for Origami Structures Exhibiting Bifurcation and Limit Point Instabilities. *International Journal of Solids and Structure*. 2018;147:80–93. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.05.011

14. Городецкий А.С., Барабаш М.С., Сидоров В.Н. *Компьютерное моделирование в задачах строительной механики.* Москва.: Издательство АСВ; 2016. 338 с.

Gorodetsky AS, Barabash MS, Sidorov VN. *Computer Modeling in Problems of Structural Mechanics*. Moscow: ASV Publishing House; 2016. 338 p. (In Russ.).

15. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. *Расчетные модели сооружений и возможность их анализа*. Москва.: ДМК Пресс; 2007. 600 с.

Perelmuter AV, Slivker VI. *Design Models of Structures and the Possibility of Their Analysis*. Moscow: DMK Press; 2007. 600 p. (In Russ.).

16. Беленя Е.И. *Металлические конструкции.* Москва.: Стройиздат; 1976.
Belenya EI. *Metal Structures*. Moscow: Stroiizdat; 1976. (In Russ.).
17. Мельников Н.П. *Металлические конструкции.* Москва.: Стройиздат; 1980.
Melnikov NP. *Metal Structures*. Moscow: Stroiizdat; 1980. (In Russ.).
18. Yang W, Lin J, Gao N, Yan R. Experimental Study on the Static Behavior of Reinforced Warren Circular Hollow Section (CHS) Tubular Trusses. *Applied Sciences.* 2018;8(11):2237. https://doi.org/10.3390/app8112237

Об авторах:
Щуцкий Сергей Викторович, доцент кафедры «Металлические, деревянные и пластмассовые конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID, svpike1@rambler.ru

Лиманцев Алексей Алексеевич, старший преподаватель кафедры «Металлические, деревянные и пластмассовые конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, alimantsev@gmail.com

Скуратов Сергей Викторович, доцент кафедры «Металлические, деревянные и пластмассовые конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID, svpike1@rambler.ru

Левенец Кристина Валерьевна, магистрант кафедры «Металлические, деревянные и пластмассовые конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, levkristina@mail.ru

Заявленный вклад авторов:
С.В. Щуцкий: формирование основной концепции, корректировка выводов.
А.А. Лиманцев: доработка текста, формирование выводов.
С.В. Скуратов: доработка текста, корректировка выводов.
К.В. Левенец: компьютерное моделирование и расчет, подготовка текста, формирование выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

Поступила в редакцию 03.04.2024
Поступила после рецензирования 24.04.2024
Принята к публикации 06.05.2024

About the Authors:
Sergei V. Shchutsky, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Metal, Wood and Plastic Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF)**,** ORCID, svpike1@rambler.ru

Aleksei A. Limantsev, Senior Lecturer of the Metal, Wood and Plastic Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, alimantsev@gmail.com

Sergei V. Skuratov, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Metal, Wood and Plastic Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, svpike1@rambler.ru

Kristina V. Levenets, Master's Student of the Metal, Wood and Plastic Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, levkristina@mail.ru

Claimed Contributorship:
SV Shchutsky: formulating the main concept, correcting the conclusions.
AA Limantsev: refining the text, formulating the conclusions.
SV Skuratov: refining the text, correcting the conclusions.
KV Levenets: computer modeling and calculations, preparing the text, formulating the conclusions.

Conflict of Interest Statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Received 03.04.2024
Revised 24.04.2024
Accepted 06.05.2024

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ
BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES

CC BY

Check for updates

Оригинальное эмпирическое исследование

УДК 624.94.012.45+692.231.3
https://doi.org/10.23947/2949–1835-2024-3-2-17-25

Современные легкие энергосберегающие наружные каркасно-обшивные стены и возможности их применения в строительстве многоэтажных железобетонных каркасных зданий в Узбекистане

А.А. Ходжаев ✉, **И.С. Каримжонов**
Туринский политехнический университет в городе Ташкенте, г. Ташкент, Республика Узбекистан
✉ axodjaev61@gmail.com

EDN: JSXNXG

Аннотация

Введение. Энергопотребление и повышение энергоэффективности зданий является наиболее актуальной задачей современного строительства. Исследования в данном направлении ведутся по широкому спектру, сопровождаясь разработкой эффективных ограждающих конструкций. Одной из разновидностей таких конструкций являются легкие ограждающие каркасно-обшивные стены, позволяющие повысить тепловую защиту зданий. Несущим элементом такой ограждающей конструкции является легкий тонкостенный профиль, заполненный теплоизолирующим материалом с невысокой плотностью. В малоэтажном строительстве применение данной технологии позволяет использовать стальные профили как в несущих, так и в ограждающих конструкциях. В многоэтажных зданиях легкие стальные тонкостенные элементы (далее — ЛСТК) используются как ненесущие ограждающие конструкции — каркасно-обшивные стены. В данной работе представлена информация о новых каркасно-обшивных стеновых конструкциях (далее — КОС), выполненных на основе ЛСТК, и возможностях их применения в качестве ограждающих конструкций при строительстве многоэтажных железобетонных каркасных зданий в температурно-климатических и сейсмических условиях Узбекистана.

Материалы и методы. Исследуемыми системами являются: многослойная комбинированная конструктивная система, состоящая из каркаса (скелета), материалов для утепления/звукоизоляции; конструкции из гнутых стальных оцинкованных тонкостенных профилей; каркасно-обшивные стены, каркас которых состоит из стальных гнутых оцинкованных профилей; наружная ограждающая конструкция здания; ригель (направляющий профиль) каркаса ненесущей конструкции; горизонтальный элемент каркаса стены, соединяющий и замыкающий вертикальные стойки каркаса стены, служит для крепления элементов заполнения каркаса стены и передачи нагрузок на вертикальные стойки каркаса стены. Рассмотрены параметры наружных ненесущих стен по местоположению, составу компонентов стены, способу и порядку монтажа.

В статье рассмотрены классификация конструкций примыкания наружных ненесущих стен к элементам здания КОС. Приведена классификация по способу изготовления наружных стен.

Результаты исследования. В результате исследования выявлены основные преимущества энергосберегающих наружных каркасно-обшивных стен. Долговечность наружных КОС обеспечивается:

1. Конструктивными решениями состава стены, оптимальной схемой размещения утеплителей, пароизоляции и ветрозащиты в сечении КОС.
2. Достаточной антикоррозийной защитой гнутых стальных оцинкованных профилей, деталей и соединительных элементов.
3. Долговечностью каждого компонента стены в составе наружной КОС.

Срок эксплуатации стен здания из КОС зависит от металлокаркаса в них. Если используется термопрофили, то конструкции из ЛСТК имеют большой срок службы, а также малый удельный вес.

Обсуждение и заключение. В результате проведенной работы отмечается, что, несмотря на столь явные преимущества системы КОС, из-за недостатка исследований указанные конструкции не имеют широкого применения в многоэтажном строительстве, в том числе и в Узбекистане, так как для решения задачи применения КОС в каче-

© Ходжаев А.А., Каримжонов И.С., 2024

стве внешних ограждающих конструкций (стен) многоэтажных каркасных зданий необходимо рассмотреть и доказать целесообразность и возможность их применения в таком качестве. Для этого нужно осуществить достоверное моделирование каркасного здания с внешними стенами из КОС с учетом их совместной пространственной работы при воздействии статических и динамических нагрузок.

Ключевые слова: каркасно-обшивная стена (КОС), легкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК), мостик холода, термопрофиль, энергосбережение, экология, теплоизоляция

Для цитирования. Ходжаев А.А., Каримжонов И.С.о. Современные легкие энергосберегающие наружные каркасно-обшивные стены и возможности их применения в строительстве многоэтажных железобетонных каркасных зданий в Узбекистане. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(2):17–25. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-2-17-25

Original Empirical Research

Modern Lightweight Energy-Saving Frame-Sheathing Exterior Walls and Possibilities of Using Thereof in Construction of the Multi-Storey Reinforced Concrete Frame Buildings in Uzbekistan

Abbas A. Khodjaev ✉, **Ibrohim S. Karimjonov**
Turin Polytechnic University in Tashkent, Tashkent, Republic of Uzbekistan
✉ axodjaev61@gmail.com

Abstract

Introduction. Energy consumption and energy efficiency enhancement of buildings are among the most expedient objectives of the modern construction. Research is conducted on a wide range of issues within this field resulting in development of the efficient enclosure systems. One of the kind of such systems are the lightweight frame-sheathing enclosure walls, which allow enhancing the heat insulation of a building. The load-bearing members of such an enclosure are the light-gauge profiles encasing the low density heat-insulating material. In low-storey construction, the application of this technology allows using the steel profiles in both load-bearing and enclosure systems. In multi-storey buildings, the light-gauge steel structures (hereinafter referred to as LGS-structures) are used as the non-load-bearing enclosures — frame-sheathing walls. The present paper seeks to present the information about the new frame-sheathing wall systems (hereinafter referred to as FSW-systems) made using the LGS-structures, and possibilities for them to serve as the enclosures in construction of the multi-storey reinforced concrete frame buildings in the temperature, climatic and seismic conditions of Uzbekistan.

Materials and Methods. The systems under study are: a multilayer combined structural system consisting of a frame (skeleton frame) and materials for thermal /sound insulation; structures made of the roll-formed light-gauge galvanized steel profiles; frame-sheathing walls with the frames made of the roll-formed galvanized steel profiles; an external enclosure system of a building; a frame beam (channel profile) of the non-load-bearing structure; a horizontal member of the wall frame, which connects and closes up the vertical studs of the wall frame and serves to fasten the filling material and to transfer the loads to the vertical studs of the wall frame. The parameters of the exterior non-load-bearing walls have been studied by location, wall component composition, installation method and procedure. The classification of the exterior non-load-bearing wall connections to the members of the FSW building has been provided in the article. The classification by the exterior wall manufacturing method has been given.

Results. As a result of the study, the main advantages of the energy-saving frame-sheathing exterior walls have been identified. The durability of the exterior FSW-systems is ensured by:

1. Constructive solutions of the wall composition, the optimal layout of the thermal insulation, vapour barrier and wind protection inside the FSW cross section.
2. Sufficient corrosion protection of the roll-formed galvanized steel profiles, parts and connections.
3. Durability of each of the wall component in the exterior FSW-system.

The service life of the walls in a FSW building depends on the steel frame they are made of. In case of using the perforated profiles, the LGS-structures have a long service life, as well as low specific gravity.

Discussion and Conclusion. Upon the result of the work carried out, it has been acknowledged that due to the lack of research, even though the advantages of the FSW-systems are obvious, these systems are not widely used in the multi-storey construction, including in Uzbekistan, because to be able to use the FSW-systems as the external enclosures (walls) of the multi-storey frame buildings, it is necessary to investigate and prove the expediency and possibility of using them in such a function. To do so, it is necessary to carry out the reliable modeling of a frame building with the exterior walls

made of FSW-systems, taking into account spatial interaction between them under the impact of static and dynamic loads.

Keywords: frame-sheathing wall (FSW), light-gauge steel structures (LGS-structures), cold joint, perforated profile, energy saving, ecology, heat insulation

For citation. Khodjaev AA, Karimzhonov IS. Modern Lightweight Energy-Saving Frame-Sheathing Exterior Walls and Possibilities of Using Thereof in Construction of the Multi-Storey Reinforced Concrete Frame Buildings in Uzbekistan. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024;3(2):17–25. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-2-17-25

Введение. Снижение энергопотребления и повышение энергоэффективности зданий является наиболее актуальной задачей современного строительства. В этом направлении осуществляются широкие исследования и разработка эффективных ограждающих конструкций. Одной из таких конструкций являются легкие ограждающие каркасно-обшивные стены, позволяющие повысить тепловую защиту зданий. Несущим элементом такой ограждающей конструкции является легкий тонкостенный профиль, заполненный теплоизолирующим материалом с невысокой плотностью (рис. 1).

Необходимо отметить, что проектирование и строительство зданий из ЛСТК в мире в настоящее время поступательно развивается. Так, доля строений индивидуального жилищного строительства (ИЖС), построенных из ЛСТК, в Великобритании составляет — 20 %, Швеции и Японии — 15 %, Канаде — 10 %, в США — в зависимости от региона, 5–15 % от общего объема жилищного строительства [1]. В малоэтажном строительстве применение данной технологии, позволяет использовать стальные профили как в несущих, так и в ограждающих конструкциях. В многоэтажных зданиях (выше 3–4 этажей) ЛСТК используются как ненесущие ограждающие конструкции — каркасно-обшивные стены.

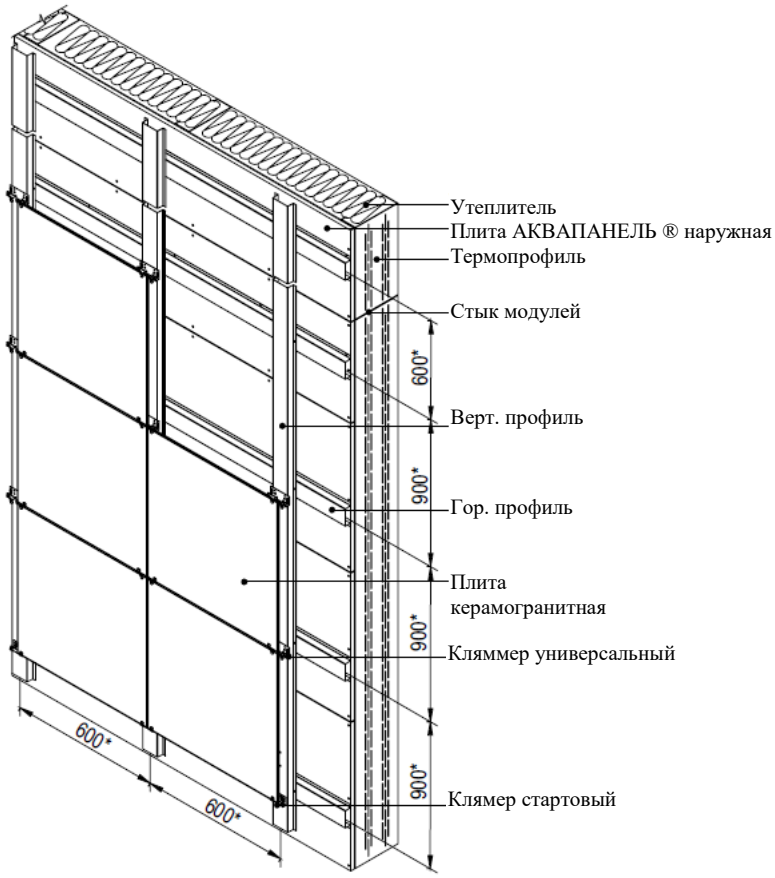


Рис. 1. Общий вид наружной каркасно-обшивной стены

Простота, скорость и удобство монтажа тонкостенных конструкций, возможность (в большинстве случаев) обойтись без грузоподъемных механизмов повышает производительность труда в 1,5–2 раза. Отсутствие «мокрых» процессов при возведении несущих и ограждающих конструкций позволяет вести строительно-монтажные работы круглогодично практически при любых погодных условиях и в любых климатических зонах. Малый вес конструкций способствует уменьшению расходов на транспортировку до места строительства, сокращает сроки

доставки. Кроме того, низкая масса таких стен обеспечивает снижение инерционных сил, что важно при строительстве в сейсмических зонах, а также общей нагрузки от здания на фундаменты.

Эти преимущества позволяют делать вывод о возможностях широкого применения конструкций из ЛСТК на территории Узбекистана. Но для практического применения этой технологии в реальном строительстве необходимы целевые исследования их конструктивных особенностей в составе каркасных зданий в условиях повышенной сейсмичности, а также резко-континентального сухого и жаркого климата.

Материалы и методы. Исследуемые системы описаны ниже:

КОС — многослойная комбинированная конструктивная система, состоящая из каркаса (скелета), материалов для утепления/звукоизоляции, заполняющих полость каркаса, обшивок стены (наружной и внутренней), крепежных элементов, пароизоляции и ветрозащиты, наружной облицовки (фасада), а также совокупности технических и технологических решений, определяющих правила и порядок установки этой системы в проектное положение (рис. 1 и 2).

ЛСТК — конструкции из гнутых стальных оцинкованных тонкостенных профилей, аббревиатура для обозначения широкого спектра конструкций из гнутых холоднокатаных профилей, применяемых в строительстве.

КОС с применением ЛСТК — каркасно-обшивные стены, каркас которых состоит из стальных гнутых оцинкованных профилей.

Стена (КОС) наружная ненесущая — наружная ограждающая конструкция здания, воспринимающая нагрузку от собственного веса и ветровую нагрузку и передающая эти нагрузки на несущие конструкции здания или непосредственно через промежуточные вспомогательные несущие элементы (например, фахверки).

Вертикальная стойка каркаса ненесущей КОС — основной вертикальный элемент каркаса, воспринимающий нагрузки от ветра, собственного веса КОС и выполняющий функции силового элемента каркаса. Одновременно служит основанием для крепления обшивок КОС и образует полости для заполнения утеплителем. Обеспечивает передачу нагрузок на несущие элементы здания через кронштейны и закладные детали.

Ригель (направляющий профиль) каркаса ненесущей КОС — горизонтальный элемент каркаса стены, соединяющий и замыкающий вертикальные стойки каркаса стены, выполняющий функции сохранения формы стенового элемента. Служит для крепления элементов заполнения каркаса стены и передачи нагрузок на вертикальные стойки каркаса стены.

В структуру каждого слоя КОС входят различные элементы (компоненты) (рис. 2).

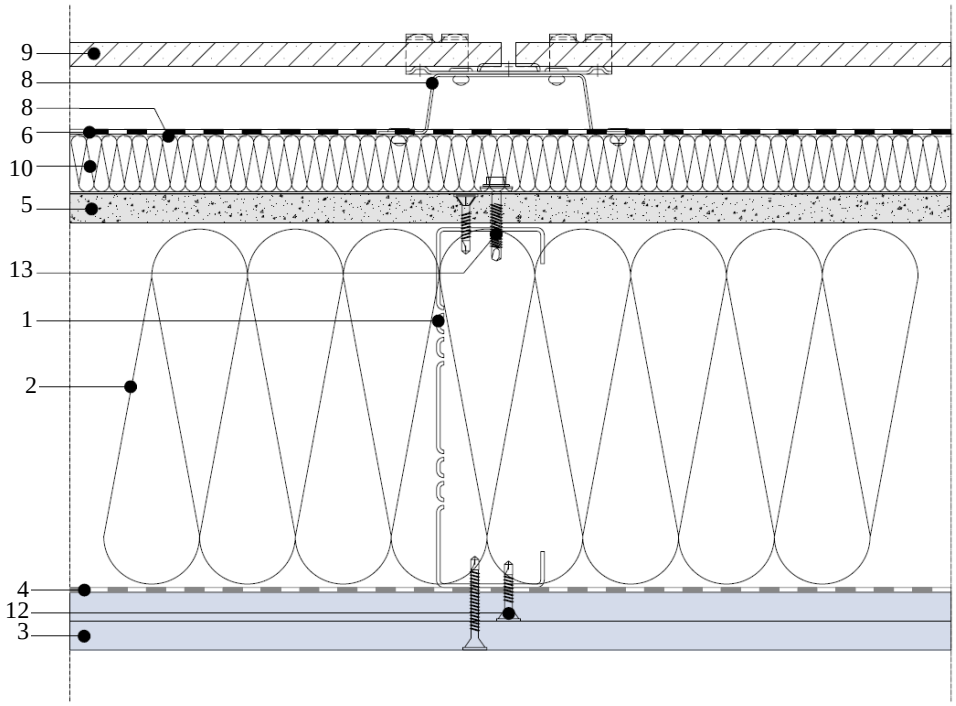


Рис. 2. Основные компоненты наружной каркасно-обшивной стены: 1 — несущие элементы каркаса (стойки, направляющие, связи); 2 — основной теплоизоляционный слой (между стойками каркаса); 3 — внутренняя обшивка КОС; 4 — пароизоляция; 5 — внешняя обшивка КОС (АКВАПАНЕЛЬ® Цементная плита Наружная); 6 — диффузионная ветрозащитная пленка; 8 — профили обрешетки (горизонтальные/вертикальные); 9 — фасадная облицовка; 10 —дополнительный наружный слой теплоизоляции (опционально); 12 — самонарезающие винты для крепления обшивок; 13 — самонарезающие винты для крепления элементов каркаса

https://www.stsg-donstu.ru

Схематическое изображение многоэтажного здания со сборно-монолитным каркасом и наружными КОС приведено на рис. 3.

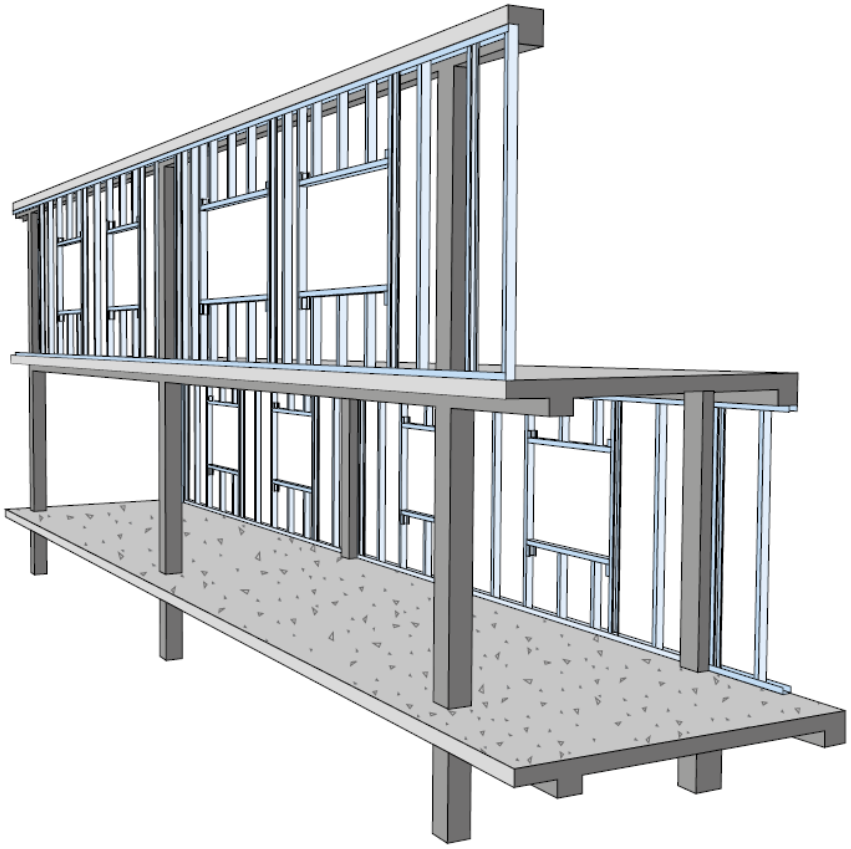


Рис. 3. Схематическое изображение ненесущих КОС с каркасом из ЛСТК (класс А или В) в здании с несущим монолитным железобетонным каркасом

Наружные ненесущие стены различаются по следующим параметрам[1]:

– по местоположению в ограждающих конструкциях (по конструктивному решению примыкания к несущим конструкциям здания);

– по составу компонентов стены;

– по способу изготовления и сборки стены;

– по способу и порядку монтажа стены в здании;

– по типам и видам облицовки стен.

По конструкции примыкания наружных ненесущих стен к элементам здания КОС условно разделяются на четыре класса (рис. 4):

класс *A* — наружные ненесущие стены с полным опиранием на перекрытие;

класс *B* — наружные ненесущие стены с частичным опиранием на перекрытие;

класс *C* — наружные самонесущие стены с опиранием на собственный фундамент;

класс *D* — наружные навесные ненесущие стены.

Каждый из указанных классов КОС отличается:

– узлами крепления, конструктивными решениями примыканий;

– расчетной схемой работы каркаса КОС под нагрузками;

– методом изготовления и монтажа конструкций.

По способу изготовления наружные КОС классифицируются следующим образом:

– поэлементная сборка (детальный метод). Каркас стен собирается на монтажной строительной площадке, там же в него укладывается теплоизоляционный материал, обшивки и все компоненты КОС. Сборка может осуществляться как с плиты перекрытия (изнутри здания), так и с лесов, подмостей, люльки (снаружи здания);

[1] КНАУФ АКВАПАНЕЛЬ. Наружная стена. Наружные ненесущие каркасно-обшивные стены с каркасом из стальных тонкостенных холодногнутых оцинкованных профилей с применением материалов *КНАУФ, Альбом технических решений*. 2018 г. https://www.knauf.ru/upload/iblock/3e2/h031xtdugqii6hhcfiq0f1our0tixfcl/299359_knauf_akvapanel_naruzhnaya_stena_naruzhnye_nenesushchie_karkasno_obshivnye_steny_s_karkasom_iz_stalnyh_tonkostennyh_holodnognutyh_ocinkovannyh_profilej_s_primeneniem_materialov_knauf.pdf (дата обращения 08.05.2024).

– модульная сборка (панельный метод). Может быть реализован как на сборочном заводе, так и на участке предварительной сборки панелей непосредственно на строительной площадке. На заводе и на участке предварительной сборки должны быть обеспечены соответствующий температурный режим, защита от осадков и ветра, стационарное оборудование по сборке панелей, склад компонентов, склад готовых панелей, упакованных для дальнейшего перемещения и монтажа КОС в проектное положение.

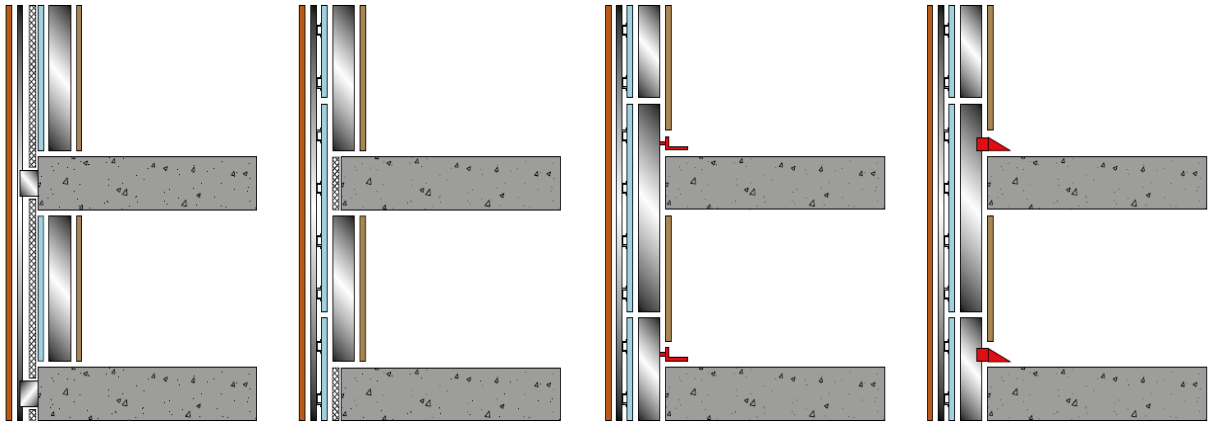


Рис. 4. Классификация наружных ненесущих стен в зависимости от типа примыкания к несущим конструкциям здания

Наружные КОС по принципу монтажа разделяются на следующие способы:

– стоечно-ригельный способ;

– модульный (панельный) способ.

Стоечно-ригельный способ напоминает устройство витражных конструкций. Каждая стойка каркаса закрепляется к междуэтажному перекрытию. Стойки имеют длину, равную высоте этажа или двух этажей, работают на ветровую нагрузку как балка на двух (трех) опорах. Крепление каждой стойки производится кронштейнами к перекрытию (балкам, каркасу) здания. Устройство оконных (дверных) проемов обеспечивается установкой горизонтальных ригелей.

Модульный способ отличается от стоечно-ригельного тем, что стойки и ригели каркаса КОС собираются в один элемент — модуль (панель). Модуль рассматривается как плоский вертикальный диск, прикрепляемый к перекрытиям в нескольких точках. Модульный (панельный) способ имеет несколько разновидностей изготовления и монтажа:

– модуль стены полной заводской готовности (ПЗГ). Все компоненты КОС собраны на заводе: установлены утеплитель, светопрозрачные конструкции, внутренние обшивки, закреплены облицовочные материалы и детали фасада. При монтаже панели герметично соединяются между собой и надежно прикрепляются к несущим элементам каркаса здания;

– модуль (панель) с наружной обшивкой (ПНО). Модуль имеет в своем составе каркас, внешнюю обшивку, наружную ветрозащиту, часть облицовочного материала, светопропускающие конструкции (опция). На монтаже каркасы панелей герметично соединяются между собой изнутри КОС, надежно закрепляются к несущим элементам здания, устанавливается теплоизоляция и пароизоляция, внутренняя обшивка. Герметизация всех наружных стыков производится одновременно с установкой облицовочных материалов;

– модуль (панель) наружный каркасный (ПНК). Модуль в своем составе имеет каркас из ЛСТК и элементы крепления к каркасу здания.

Результаты исследования. Элементы каркасов панелей герметично соединяются во время монтажа. Обшивки, утеплитель, светопропускающие конструкции и фасадная облицовка устанавливаются после монтажа модулей стен.

При конструировании наружных КОС за основу принимается архитектурный проект и конструктивная схема здания (нагрузки и принципы обеспечения общей устойчивости). Необходимо также принять во внимание проект инженерных систем здания, в случае если коммуникации расположены внутри стен и/или прикрепляются к ним.

При проектировании КОС, для удобства графического изображения и специфицирования элементов ЛСТК, все элементы фрагмента каркаса стены объединяют в модуль (панель) — набор вертикальных стоек и горизонтальных направляющих, деталей и метизов.

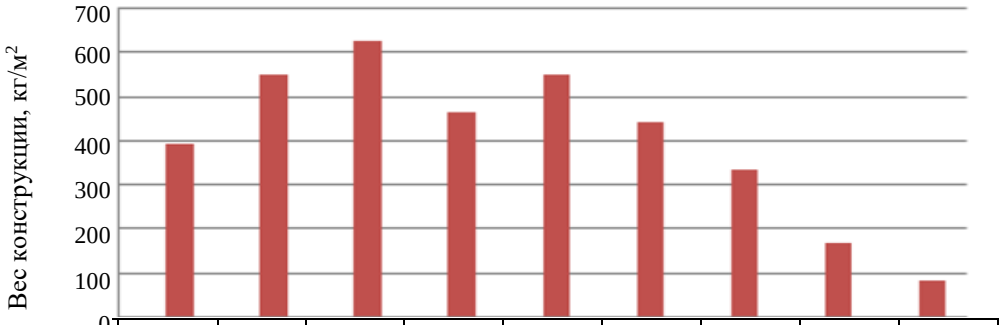
https://www.stsg-donstu.ru

Проведенный анализ известных систем и технологий легких энергосберегающих наружных каркасно-обшивных стен позволил установить основные преимущества:

1. Надежность и продолжительное время эксплуатации. Время эксплуатации зданий с наружными стенами из КОС определяется в основном сроком службы металлокаркаса в наружных стенах, плитных материалов обшивки, утеплителя. При использовании термопрофилей, которые изготавливаются из оцинкованной стали с нормой расхода цинка 275 г/м^2, согласно исследованиям British Steel, в соответствии с естественной эмиссией цинка время жизни конструкций из ЛСТК составляет более 100 лет.

2. Малый удельный вес конструкций. Вес 1 м^2 несущего стального каркаса здания находится в пределах 50–80 кг в зависимости от применяемых в составе стены материалов. Это преимущество позволяет снизить затраты применяя фундамент и другие несущие конструкции здания [2].

На рис. 5 приведен сравнительный анализ весогабаритных характеристик ограждающих конструкций с равным значением теплопроводности, но выполненных из различных материалов.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Толщина, м	0,324	0,426	0,49	0,389	0,36	0,365	0,437	0,335	0,275
Вес, кг/м^2	392,6	547,6	624,5	463,1	546	440	333,7	166,5	80

Рис. 5. Сравнительный анализ весогабаритных характеристик ограждающих конструкций с равным значением теплопроводности, выполненных из различных материалов: 1 — монолитная стена, выполненная из несъемной опалубки (вариант); 2 — монолитная стена, выполненная из несъемной опалубки (вариант); 3 — стена, выполненная из двух слоев кирпича с заключенным между ними эффективным утеплителем; 4 — стена, выполненная из кирпича, прикрепленного к ней утеплителя и слоя штукатурки; 5 — монолитная железобетонная плита с утеплителем и облицовочным кирпичом; 6 — монолитная железобетонная плита с утеплителем и вентилируемым фасадом; 7 — стена из ячеистых блоков со штукатуркой, утеплителем и облицовочным кирпичом; 8 — стена из ячеистых блоков со штукатуркой, утеплителем и вентилируемым фасадом; 9 — легкая стальная ограждающая конструкция — каркасно-обшивная стена [3]

Данная диаграмма красноречиво демонстрирует явное преимущество КОС по весогабаритным характеристикам ограждающих конструкций с равным значением теплопроводности в сравнении с другими видами ограждающих конструкций.

3. Эффективное энергосбережение. Применение эффективного утеплителя в каркасах из перфорированных термопрофилей позволяет получать значения коэффициента теплопроводности 0,045 Вт/(м×К) без учета возможных вариантов утепления по фасаду. Это свойство позволяет значительно снизить издержки при эксплуатации зданий.

4. Экологичность. В составе конструкций зданий, построенных с применением термопрофиля, в качестве внутренней обшивки обычно применяются гипсокартонные листы. Внешняя обшивка — стекломагниевые плиты (стекломагнезит), а также цементно-минеральные плиты, а в качестве утеплителя используется минеральная каменная вата, являющаяся экологически чистой.

Производство, транспортировка, монтаж и эксплуатация КОС требуют гораздо меньших энергетических затрат, чем при использовании традиционных материалов.

Спроектированные и построенные с применением термопрофиля здания не имеют синдрома «больного здания», связанного с излишней влагой, а внутреннее пространство зданий является безопасной, эргономически и экологически комфортной средой за счет хорошей шумоизоляции и влаговоздухонепроницаемости.

5. Быстрый эффективный всесезонный монтаж. Будучи «сухим» способом строительства, монтаж наружных стен здания из термопрофиля может осуществляться всесезонно.

Это особенно важно для инвестора при строительстве экономичного жилья, когда возврат вложенных средств является определяющим фактором. Сокращение сроков строительства каркасного здания и, как следствие, его стоимости, зависит еще и от степени оптимизации строительного процесса.

6. Низкая эксплуатационная стоимость. Здания, построенные с применением термопрофиля, имеют стабильные размеры, хорошо защищены от влияния биологических и температурно-влажностных процессов, долговечны, энергоэкономичны, а при окончании срока службы или при необходимости капитального ремонта не столь затратны, как строения из классических материалов.

7. Не подвержены влиянию биологических процессов. Высокая степень надежности строений из термопрофилей обеспечивается стабильностью размеров стальных профилей, которые не подвержены влиянию биологических и влажностно-температурных процессов в отличие от, например, древесины.

8. Высокая точность при сборке. Самая современная линия по изготовлению термопрофилей полностью автоматизирована и управляется одним человеком. Это, в свою очередь, минимизирует человеческий фактор при сборке, уменьшает время строительства объекта, не требует тяжелой грузоподъемной техники.

Обсуждение и заключение. В результате проведенной работы авторы отмечают, что основными традиционными строительными материалами для ограждающих конструкций жилых и общественных зданий в Узбекистане являются кирпич, железобетон и газобетон. Но в настоящее время, когда острота проблемы энергосбережения в мире нарастает с каждым годом, когда проблемы повышения экологичности и необходимости удешевления строительства при повышении надежности зданий и сооружений, особенно в сейсмических районах, по актуальности выходят на первый план, необходимы инновационные технологии, обеспечивающие решение этих проблем. Одним из эффективных решений в этом плане может стать применение каркасно-обшивных стен в многоэтажном жилищном и общественном строительстве.

Несмотря на столь явные преимущества системы КОС, из-за недостатка исследований указанные конструкции не имеют широкого применения в многоэтажном строительстве, в том числе и в Узбекистане.

Для решения задачи применения КОС в качестве внешних ограждающих конструкций (стен) многоэтажных каркасных зданий необходимо рассмотреть и доказать целесообразность и возможность их применения в таком качестве. Для этого нужно осуществить достоверное моделирование каркасного здания с внешними стенами из КОС с учетом их совместной пространственной работы при воздействии статических и динамических нагрузок. В настоящее время авторами проводятся комплексные исследования в этом направлении, о результатах которых будут опубликованы соответствующие статьи.

Список литературы / References

1. Жмарин Е.Н. Международная ассоциация легкого стального строительства. *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2012;2:27–30. https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2012/2(2)/6_zhmarin.pdf (дата обращения: 08.05.2024).

Zhmarin EN. International Association of Light-Gauge Steel Construction. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2012;2:27–30. https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2012/2(2)/6_zhmarin.pdf (accessed: 08 05.2024). (In Russ.).

2. Акпанов А.А. Применение стальных конструкций в малоэтажных зданиях. *Наука и техника Казахстана.* 2017;(1–2):4–13. https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-stalnyh-konstruktsiy-v-maloetazhnyh-zdaniyah (дата обращения: 08.05.2024).

Akpanov AA. Application of Steel Structures in Low-Storey Buildings. *Science and Technology of Kazakhstan*. 2017;(1–2):4–13. https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-stalnyh-konstruktsiy-v-maloetazhnyh-zdaniyah (accessed: 08.05.2024). (In Russ.).

3. Орлова А.В., Жмарин Е.Н., Парамонов К.О. Энергетическая эффективность домов из ЛСТК. *Строительство уникальных зданий и сооружений.* 2013;6(11):1–13. https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2013/6(11)/1_z_p_o_11.pdf (дата обращения: 08.05.2024).

Orlova AV, Zhmarin EN, Paramonov KO. Power Efficiency of Houses from Light-Gauge Steel Structures. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2013;6(11):1–13. https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2013/6(11)/1_z_p_o_11.pdf (accessed: 08.05.2024).

4. Кузьменко Д.В. Ограждающая термопанель с каркасом из термопрофилей. *Жилищное строительство.* 2009;4:12–14.

Kuzmenko DV. Enclosing Thermal Panel with a Frame Made af Thermal Profiles. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo*. 2009;4:12–14.

Об авторах:

Ходжаев Аббас Агзамович, начальник отдела контроля учебных программ и учебной литературы Министерства высшего и среднего специального профессионального образования, профессор Туринского политехнического университета в городе Ташкенте (Республика Узбекистан, г. Ташкент, ул. Малая кольцевая дорога, 17), доктор технических наук, профессор, ORCID, axodjaev61@gmail.com

Каримжонов Иброхим Соибжон-оглы, соискатель кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Туринского политехнического университета в городе Ташкенте (Республика Узбекистан, г. Ташкент, ул. Малая кольцевая дорога, 17), ORCID, ibrokhim.k.323@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

А.А. Ходжаев: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, научное руководство, корректировка выводов;

И.С. Каримжонов: анализ результатов исследований, проведение расчетов, формирование выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 11.05.2024
Поступила после рецензирования 28.05.2024
Принята к публикации 07.06.2024

About the Authors:

Abbas A. Khodjaev, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Head of the Curricula and Educational Literature Control Department, Ministry of Higher and Secondary Vocational Education of the Republic of Uzbekistan; Professor, Turin Polytechnic University in Tashkent (17, Malaya Koltsevaya Rd., Tashkent, Republic of Uzbekistan), ORCID, axodjaev61@gmail.com

Ibrohim S. Karimjonov, Degree Seeking Applicant of the Reinforced Concrete and Stone Structures Department, Turin Polytechnic University in Tashkent (17, Malaya Koltsevaya Rd., Tashkent, Republic of Uzbekistan), ORCID, ibrokhim.k.323@gmail.com

Claimed Contributorship:

Khodjaev AA: formulating the main concept, aim and objectives of the research, scientific supervision, correcting the conclusions.

Karimjonov IS: analysis of the research results, conducting the calculations, formulating the conclusions.

Conflict of Interest Statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Received 11.05.2024
Revised 28.05.2024
Accepted 07.06.2024

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ
FOOTINGS AND FOUNDATIONS, SUBSURFACE STRUCTURES

CC BY

Check for updates

Оригинальное эмпирическое исследование

УДК 624.1
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-2-26-32

К вопросу определения изменения влажности при замачивании котлована в лессовых толщах

И.Ю. Дежина ✉
Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ irdezhina@yandex.ru

EDN: JXIEIF

Аннотация

Введение. В связи с интенсификацией строительства в районах распространения лессовых просадочных грунтов вопросы прогнозирования развития процессов подтопления являются актуальной задачей, т.к. могут привести к аварийному замачиванию, неравномерному подъему горизонта грунтовых вод, изменению напряженно-деформированного состояния грунтов и, соответственно, к потере пригодности эксплуатации здания или сооружения. Лессовый грунт обладает ярко выраженной фильтрационной анизотропией. Просадка, фильтрация воды происходят в условиях неполного водонасыщения. Появление новых компьютерных технологий позволяет совершенствовать методы математического моделирования и разрабатывать математические модели численными методами, достоверно отражающими внутрипочвенные процессы. Настоящая статья посвящена совершенствованию математической модели задачи влагопереноса для неоднородных фильтрационно-анизотропных лессовых грунтов с учетом их структурных особенностей.

Материалы и методы. Исследование включает:

– механико-математическое моделирование процессов фильтрации и влагопереноса в лессовых просадочных грунтах, в которых скорость фильтрации определяется согласно закону Дарси; всасывающее давление, водопроницаемость — заданные функции насыщенности;

– анализ физико-механических и структурных характеристик лессовых грунтов;

– рассмотрение постановок и решения начально-краевых задач по замачиванию лессовых толщ;

– численные эксперименты по прогнозированию замачивания котлована;

– сопоставление результатов с данными экспериментов.

Результаты исследования. Установлено, что существующие методики расчета не всегда достоверно отражают процесс фильтрации и влагопереноса в лессовых грунтах. Сформулировано определяющее уравнение влагопереноса. Предложена математическая модель задачи влагопереноса в неоднородных фильтрационно-анизотропных средах, учитывающая структурные характеристики лессового грунта. Решение начально-краевой задачи получено итерационными методами с линеаризацией решения на достаточно малых отрезках времени. Для практической реализации теоретического решения разработана блок-схема алгоритма программы, включающая вычисление физико-механических характеристик конечных элементов и геометрических размеров расчетной области, разбиение расчетной области на узлы и треугольные элементы, определение коэффициентов фильтрации и диффузии, формирование параметров уравнения по схеме Кранка-Николсона, решение системы уравнения методом компактного исключения и формирование вектора влажности. Разработан алгоритм решения осесимметричной задачи влагопереноса в условиях неполного водонасыщения, особенностью которого является применение устойчивой схемы прямого интегрирования уравнения влагопереноса. Сопоставлены результаты численного эксперимента и полевого испытания при замачивании круглого котлована. Результаты численных экспериментов представлены в виде кривых равных значений объемной влажности в разные периоды времени. Установлено, что результаты решения хорошо согласуются с опытными данными.

Обсуждение и заключение. Результаты теоретических исследований задачи влагопереноса в ненасыщенных лессовых грунтах обосновали постановку и конечно-элементное решение задачи влагопереноса для ненасыщенных

© Дежина И.Ю., 2024

сред без учета напряженно-деформированного состояния. На основе экспериментальных данных по замачиванию опытного котлована выполнена проверка методики расчета, показавшая совпадение результатов расчета и эксперимента по замачиванию опытного котлована. Предлагаемую методику расчета рекомендуется использовать при расчете по второй группе предельных состояний — по деформациям.

Ключевые слова: лессовые грунты, влагоперенос, вариационные уравнения, метод конечных элементов, ненасыщенные среды, круглый котлован

Для цитирования. Дежина И.Ю. К вопросу определения изменения влажности при замачивании котлована в лессовых толщах. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(2):26–32. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-2-26-32

Original Empirical Research

About Determination of Moisture Changes during Presoaking an Excavation Pit in Loess Strata

Irina Yu. Dezhina
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ irdezhina@yandex.ru

Abstract

Introduction. Due to intensified construction in the areas of loess subsiding soils, the issue of forecasting the evolvement of underflooding processes is becoming a relevant objective, since these processes can cause the emergency seepage, uneven groundwater surge, change of the soil stress-strain state and, as a result, impossibility to operate the buildings or structures. Loess soils are attributed with the distinct anisotropic permeability. Subsidence and water infiltration take place in condition of incomplete water saturation. Emergence of the advanced computer technologies makes it possible to improve the mathematical modeling and develop the mathematical models by means of numerical computation, which reliably reflects the intra-soil processes. The article strives to improve a mathematical model of the moisture transfer problem in nonhomogeneous loess soils with anisotropic permeability, taking into account their structural features.

Materials and Methods. The research includes:

– mechanical and mathematical modeling the infiltration and moisture transfer processes in loess subsiding soils, in which the percolation rate is determined according to Darcy's law; suction pressure, water permeability are the given functions of saturation;

– analysis of the physical and mechanical and structural properties of loess soils;

– study of the formulations and solutions of initial value and boundary value problems during presoaking the loess strata;

– numerical experiments on the forecast of excavation pit presoaking;

– comparing the results with the experimental data.

Results. It has been acknowledged that the existing calculation methodologies do not always reliably reflect the process of infiltration and moisture transfer in loess soils. An equation determining the moisture transfer was formulated. A mathematical model of the moisture transfer problem in nonhomogeneous media with anisotropic permeability was proposed, which took into account the structural properties of loess soils. The initial value and boundary value problems were solved by the iterative methods with linearization of the solution over sufficiently small time spans. For practical implementation of the theoretical solution, a flow chart of the program algorithm was developed, which included the calculation of the physical and mechanical properties of finite elements and the computational domain dimensions, as well as partitioning the computational domain into the units and triangular elements, determination of the permeability and diffusion coefficients, formation of the parameters of an equation according to the Krank-Nicholson scheme, solution of the system of equations by the compact elimination method and constructing a vector of moisture. An algorithm for solving the axisymmetric problem of moisture transfer in condition of incomplete water saturation has been developed, which is characterised by stability of direct integration of the moisture transfer equation. The results of the numerical experiments and field tests on presoaking a circular-shaped excavation pit have been compared. The results of the numerical experiments have been presented in the curves of the volume moisture values in different periods of time. It has been found that the results of the solution are well cohered with the experimental data.

Discussion and Conclusion. The results of the theoretical research of the problem of moisture transfer in unsaturated loess soils have justified the formulation and the finite element solution of the problem of moisture transfer in unsaturated media, without taking into account the stress-strain state. Based on the experimental data on test excavation pit presoaking, the calculation methodology was verified, and showed the coherence of calculated and experimental results. The proposed methodology is recommended for calculation of the second group of limit states — the deformations.

Keywords: loess soils, moisture transfer, variational equations, finite element method, unsaturated media, circular-shaped excavation pit

For citation. Dezhina IYu. About Determination of Moisture Changes during Presoaking an Excavation Pit in Loess Strata. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024;3(2):26–32. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-2-26-32

Введение. В связи с интенсификацией строительства в районах распространения лессовых просадочных грунтов в условиях возможного замачивания в результате хозяйственной деятельности человека вопросы прогнозирования напряженно-деформированного состояния в основании приобретают существенное значение. Лессовые просадочные грунты — пылевато-глинистые макропористые грунты, размер частиц 0,05–0,005 мм. При замачивании они дают просадку, степень влажности $S_r < 0{,}8$, пористость n = 44–53 %, плотность скелета просадочного грунта ρ_d = 1,2–1,6 т/м^3. Лессовые грунты различаются по минералогическому составу, по структурным характеристикам, имеют различный солевой состав, величину относительной просадочности.

Деформационные и прочностные характеристики зависят от влажности. Особенностью лессовых грунтов является появление просадочных деформаций при обводнении. При этом снижаются прочностные и деформационные характеристики грунта, возникают неравномерные деформации зданий и сооружений (повышение влажности в связи с нарушением условий нормальной аэрации застроенных территорий, утечкой воды из водонесущих коммуникаций, колебаниями горизонта грунтовых вод).

Изучение влияния обводнения на изменение физико-механических и структурных характеристик лессовых оснований и напряженно-деформированное состояние в основании фундаментов является актуальной задачей. Исследованию процессов фильтрации лессовых просадочных грунтов посвящены работы Li Y., Shi W., Audin A. [1], Королева В.А. [2], Ситникова А.Б. [4], Доржиева А.А. [6], Черного Б.И. [11], Мажиева Х.Н. [12] и др.

В соответствии с действующими нормативными документами определение просадки от собственного веса или дополнительной нагрузки от сооружения рассчитывают, исходя из полного водонасыщения грунта. Однако просадка начинается значительно раньше. Скорость нарастания деформаций также имеет существенное значение и зависит от процесса влагопереноса, фильтрационных особенностей грунта.

Материалы и методы. Автором представлены основные разрешающие уравнения нестационарной задачи фильтрации в грунтах при неполном водонасыщении [5]. Давление, коэффициент водопроницаемости, коэффициент диффузии принимаются зависящими от насыщенности.

При выводе уравнения движения влаги исходим из уравнения Полубариновой-Кочиной П.Я. для неполного водонасыщения, закона Дарси и формулы Аверьянова [3]:

$$K(w) = K_1 \left[\frac{w - w_0}{m - w_0} \right]^{3.56}, \tag{1}$$

где K_1 — коэффициент фильтрации при полном водонасыщении; m — пористость грунта; w_0 — количество связанной воды в единице объема грунта (объемная влажность связанной воды).

$$P_W = -\frac{P_0 \cdot w_0}{w} \cdot \frac{w_n^3 - w}{w_n^3 - w_0^3}, \tag{2}$$

где P_0 — давление при влажности w_0 связанной воды; w_n — влажность полного водонасыщения.

Значение влажности связанной воды w_0:

$$w_0 = w_{vs} + w_{rs}, \tag{3}$$

где w_{vs} соответствует влажности воздушно-сухого (количеству влаги в образце при относительной влажности 55 % и температуре 19–20 °С).

Использование вместо формул Аверьянова С.Ф. эмпирической зависимости для всасывающего давления [6] позволяет более полно учесть свойства лессовых грунтов.

Начально-краевая задача влагопереноса имеет вид:

$$-B^T kJ - B^T DBw + \dot{w} = 0, \qquad \in V;$$

$$-B_S^T kJ - B_S^T DBw - V_S = 0, \qquad \in S_3;$$

$$w - w_S = 0; \qquad \in S_4;$$

https://www.stsg-donstu.ru

$$w - w_0 = 0; \qquad \in V, S, t = 0, \tag{4}$$

где B — матрица операций дифференцирования; D — матрица коэффициентов диффузии; V — скорость фильтрации; w — скорость изменения содержания влаги.

При неполном водонасыщении имеет место закон Дарси:

$$V = -DBw - kJ, \qquad \in V. \tag{5}$$

Коэффициенты фильтрации k и давление жидкости P определялись по формулам (1) и (2).

Для получения решения последовательно на достаточно малых отрезках $\tau \in [0, \Delta t]$ считаем, что коэффициент диффузии на $[0, \Delta t]$ постоянен и равен D^n, который вычисляется по w^n в начале временного этапа. Система уравнений (3) на произвольном интервале линеаризуется. Используем вариационное уравнение в свертках [8] и метод конечных элементов[1] для построения решения на произвольном временном интервале.

Определяющее уравнение влагопереноса в матричной форме на временном интервале Δt имеет вид:

$$\left(\theta \cdot \Delta t \cdot K^n \cdot 3 \cdot C\right) \cdot q^{n+1} + \left[\left(3-\theta\right) \cdot \Delta t \cdot K^n - 3 \cdot C\right] \cdot q^n + \left[P^n \cdot \left(3-\theta\right) + \theta \cdot P^{n+1}\right] = 0, \tag{6}$$

где θ — параметр устойчивости вычислительной схемы (принято $\theta = \frac{3}{2}$ по схеме Кранка-Николсона).

Матрица водопроницаемости:

$$K^n = \int_V \Phi^T D^n \Phi dV. \tag{7}$$

Матрица влагопереноса:

$$C = \int_V \varphi \cdot \varphi^T dV. \tag{8}$$

Вектор узловой скорости фильтрации:

$$P = \int_V \Phi^T K^n I dV + \int_V \varphi V_S \, dS, \tag{9}$$

где V_s — скорость фильтрации.

Для получения устойчивых схем прямого интегрирования уравнений влагопереноса использован метод точечного сохранения инвариантов (далее — МТСИ) [9]. Процесс решения нелинейных уравнений с помощью схемы прямого интегрирования состоит в последовательном продвижении по шагам вдоль временной оси.

Для консервативных задач влагопереноса сохраняемой величиной является суммарная влажность в рассматриваемом объеме пористой среды. Консервативность задачи обусловлена отсутствием узловых источников и стоков влаги в конечно-элементной модели.

$$g \cdot \left(Kq + C\dot{q}\right) = 0. \tag{10}$$

Представим решение уравнения (10) на $(n+1)$ временном отрезке в виде суммы консервативной и неконсервативной частей:

$$q^{n+1} = q_1^{n+1} + q_2^{n+1}. \tag{11}$$

Приближенное решение будем получать при помощи схемы Кранка-Николсона, элементы которой определяются по значениям узловой влажности $w^n(t = t^n)$:

Консервативная часть решения:

$$\left(K^n + \frac{2C}{\Delta t}\right) q_1^{n+1} = \left(-K^n + \frac{2C}{\Delta t}\right) q^n - 2P_1^n. \tag{12}$$

Неконсервативная часть решения:

$$\left(K^n + \frac{2C}{\Delta t}\right) q_2^n = -2P_2^n - 2P_2^{n+1}; \tag{13}$$

$$P_1^n = \int_V \Phi^T K^n I dV; \tag{14}$$

[1] Jeremic B. Nonlinear Finite Element Methods for Realistic Modeling and Simulation of Earthquakes and/or Soils and/or Structures and their Interaction. Davis, CA, USA: University of California; 2024. 16 p. URL: http://sokocalo.engr.ucdavis.edu/~jeremic/LectureNotes/ (дата обращения: 29.03.2024).

$$P_2^n = \int_S \varphi V_S^m dS \,. \tag{15}$$

Решение q^{n+1} по физическому смыслу соответствует движению влаги в объеме V пористой среды с водонепроницаемыми границами.

Для конечно-элементной модели суммарная влажность:

$$W = \sum_{r=1}^{m} \int_{(v1)} W_r \, dV_r = const \,, \tag{16}$$

где V_r — объем конечного элемента r; W_r — функция распределения влаги в r конечном элементе; m — общее число элементов дискретной модели.

Выражение (16) используем для построения устойчивой схемы прямого интегрирования.

Последовательность решения с применением метода МТСИ для решения задач влагопереноса следующая. Из уравнения (11) определяем q_1^{n+1}. Проверяем условие:

$$q_0 \le \tilde{q}_1^{n+1} \le q_0^{sat} \,. \tag{17}$$

Если условие (17) выполняется, то вычисляем вектор влажности для следующего временного интервала по формуле (11). Или подсчитываем корректирующий модуль:

$$\gamma = \frac{W\left(q_1^0\right)}{W\left(q_1^{n+1}\right)_{const} + W\left(q_1^{n+1}\right)} \,. \tag{18}$$

Уточняем вектор влажности по формуле:

$$\tilde{q}_1^{n+1} = \gamma \cdot q_1^{n+1} \,. \tag{19}$$

Достоверность прогнозирования процесса влагопереноса автором проверялась путем сопоставления результатов численного эксперимента с результатами крупномасштабных полевых испытаний с замачиванием основания по схемам «одной кривой» и двух кривых в г. Грозном [10, 11]. Анализ полученных результатов показывает, что устойчивость схемы прямого интегрирования, кроме параметра θ, зависит от временного интервала Δt, времени замачивания, объема введенной в грунт воды, физико-механических характеристик грунта.

Рассмотрена конечно-элементная дискретизация осесимметричной задачи в виде треугольных элементов.

Модель грунта представляется как неоднородная, фильтрационно-анизотропная среда в условиях неполного водонасыщения.

Исходными данными являются следующие величины: коэффициенты фильтрации в горизонтальном направлении k_f^g и вертикальном направлении k_f^v; влажность при полном водонасыщении w_{sat}; коэффициент пористости e; начальная влажность w_{est}; объемная влажность связанной воды w_0; давление влажности связанной воды P_0; временной интервал Δt; параметры расчетной области. Алгоритм решения предусматривает формирование физико-механических характеристик конечных элементов и геометрических размеров расчетной области, разбиение расчетной области на узлы и треугольные элементы, определение коэффициентов фильтрации и диффузии, формирование параметров уравнения по схеме Кранка-Николсона, решение системы уравнения методом компактного исключения и формирование вектора влажности.

Результаты исследования. Требуется определить изменение влажности в пределах просадочного слоя при замачивании опытного круглого котлована диаметром 10 м, глубиной 0,4 м в г. Грозном (таблица 1).

Таблица 1

Физико-механические характеристики грунта в г. Грозном

—	ρ	W	e	S_r	ρ_s	W_L	W_P
W_{est}	1,53	0,08	0,93	0,26	2,7	0,226	0,168
W_{sat}	1,88	0,33	0,93	0,97	2,7	0,226	0,1686

Опытная площадка сложена легкими лессовидными суглинками, переходящими в супесь. Просадочная толща имеет мощность 8–9 м и подстилается слоем песка. Относительная просадочность грунта при давлении 0,2–0,3 МПа достигает величины ξ_{sl} = 0,11–0,12, что является очень высоким значением, свидетельствующим о практически полном разрушении структуры грунта при увлажнении.

Для решения задачи методом конечных элементов массив грунта радиусом 16 м и глубиной 8 м делится на треугольные элементы. По результатам расчета построены изолинии влажности (рис. 1) в различные промежутки времени (0,2–5 суток) (таблица 2). В расчете принято w_0 = 0,1; k_f^v = 0,7 м/сут.; k_f^g = 0,538 м/сут.; w_{vol}^{est} = 0,126; w_{vol}^{sat} = 0,48.

https://www.stsg-donstu.ru

Таблица 2

Глубина промачивания лессовой толщи в различные промежутки времени (от дна котлована)

T, дни	Эксперимент, м	Расчет, м
0,40	—	1,25
1,00	2,00	2,40
2,00	4,00	4,10
3,00	6,00	5,65
4,00	7,50	7,10

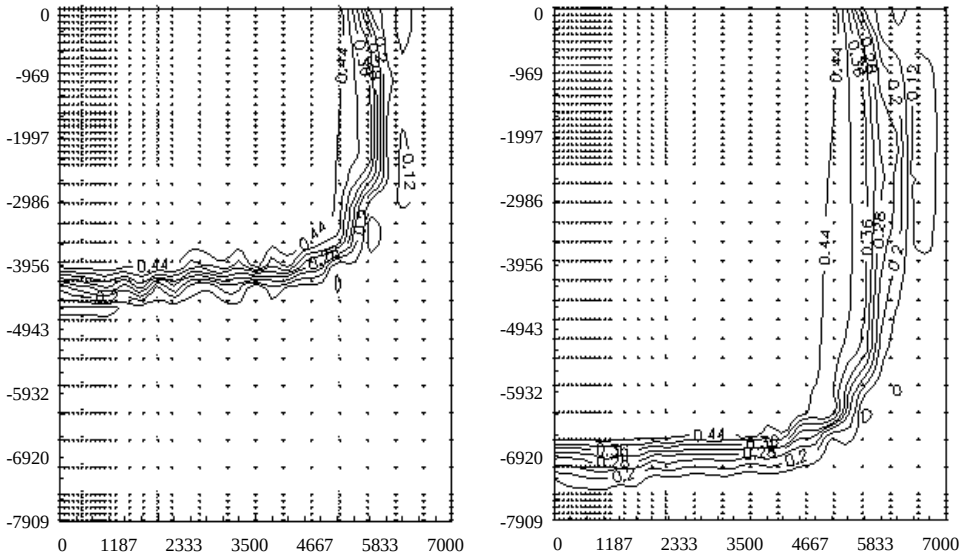


Рис. 1. Положение изолиний влажности (от поверхности грунта, мм) через 2 и 4 суток замачивания (котлован в г. Грозном); Δt =0,005 сут.

Расчетом подтверждаются выводы о том, что при достаточно большой площади зеркала воды в высокопористых грунтах и отсутствии водоупора на пути движения фильтрационного потока фронт инфильтрации из котлована перемещается вниз практически плоскопараллельно, и растекание воды в стороны невелико.

Обсуждение и заключение. Разработана математическая модель задачи влагопереноса для ненасыщенно-насыщенных неоднородных фильтрационно-анизотропных лессовых толщ с учетом структурных характеристик грунта. Разработан алгоритм расчета и решена осесимметричная задача влагопереноса в условиях неполного водонасыщения. Сопоставлены результаты численных экспериментов и полевого испытания при замачивании круглого котлована. Установлено, что результаты решения хорошо согласуются с опытными данными. Предложенную методику рекомендуется использовать в расчетах по второй группе предельных состояний — по деформациям.

Список литературы / References

1. Li Y, Shi W, Aydin A, Beroya-Eitner MA, Gao G. Loess Genesis and Worldwide Distribution. *Earth-Science Reviews.* 2020;201:102947. http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102947

2. Королев В.А., Федяева Е.А. Закономерности термовлагопереноса в лессовых грунтах. *Инженерная геология.* 2013;2:62–71. URL: http://csl.isc.irk.ru/BD/Журналы/Инженерная%20геология%202013/№2/стр%2062-71.pdf (дата обращения: 29.03.2024).

Korolev VA, Fedyaeva EA. Thermal Moisture Transfer Regularities in Loessial Soils. *Engineering Geology World*. 2013;2:62–71. URL: http://csl.isc.irk.ru/BD/Журналы/Инженерная%20геология%202013/№2/стр%2062-71.pdf (accessed: 29.03.2024). (In Russ.).

3. Woessner WW, Poeter EP. *Hydrogeologic Properties of Earth Materials and Principles of Groundwater Flow.* Guelph, Ontario, Canada: The Groundwater Project; 2020. 205 p. URL: https://www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/hydrogeologic-properties-of-earth-materials-and-principles-of-groundwater-flow.pdf (accessed: 29.03.2024).

4. Ситников А.Б. Рекомендуемая методика математического моделирования нелинейного влагопереноса в ненасыщенно-насыщенных грунтах. *Геологічний журнал*. 2009;(2):77–85. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_20507486_74705026.pdf (дата обращения: 29.03.2024)

Sitnikov AB. The Suggested Technique of Mathematical Modeling for the Non-Linear Moisture Transfer in Unsaturated-Saturated Soils. *Geologichnii zhurnal*. 2009;(2):77–85. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_20507486_74705026.pdf (accessed: 29. 03.2024). (In Russ.).

5. Dezhina IYu. On Calculation Method for Dangerously Hydrated Loess Soil with Consideration for Elastic-Plastic Soil Properties. In: *Proceedings of the International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2018), 26–28 September 2018, South Ural State University, Russian Federation. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Volume 451*. IOP Publishing; 2018. 012106. http://doi.org/10.1088/1757-899X/451/1/012106

6. Доржиев А.А., Скибин Г.М., Доржиев А.Г. Определение структурной прочности грунтов на застроенных территориях в процессе эксплуатации. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и Архитектура.* 2014;(3):148–157. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21615062 (дата обращения: 29.03.2024).

Dordzhiev AA, Skibin GM, Dordzhiev AG. Determination of the Structural Strength of Soil on the Built-Up Areas during Operation. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i Arkhitektura*. 2014;(3):148-157. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21615062 (accessed: 29.03.2024). (In Russ.).

7. Cline D. *Variational Principles in Classical Mechanics.* Rochester: University of Rochester; 2017. 565 p.

8. Kostin GV, Saurin VV. Variational Approach to Static and Dynamic Elasticity Problems. In book: *Recent Advances in Mechanics*. Kounadis AN, Gdoutos EE (eds.). Dordrecht: Springer; 2011. P. 131–158. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0557-9_8

9. Васильков Г.В. *Эволюционная теория жизненного цикла механических систем: теория сооружений.* М.: Издательство ЛКИ; 2008. 320 с.

Vasilkov G.V. *Evolutionary Theory of the Life Cycle of Mechanical Systems: Theory of Structures.* Moscow: LKI Publishing House; 2008. 320 p. (In Russ.).

10. Черный Б.И. Расчет режима увлажнения лессового основания. В книге: *Механические свойства грунтов и строительства на увлажненных лессовых основаниях*. Ломизе Г.М. (ред.). Грозный: Чечено-Ингушское книжное издательство; 1968;157–162. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_006346787/?ysclid=ltxmi8a8xr403583985 (дата обращения: 29.03.2024).

Chernyi BI. Calculation of the Moisture Regime of the Loess Soil Base. In book: Mechanical Properties of Soils and Construction on Moistened Loess Soil Bases. Lomize GM (ed.). Grozny: Chechen-Ingush Publishing House; 1968;157–162. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_006346787/?ysclid=ltxmi8a8xr403583985 (accessed: 29.03.2024). (In Russ.).

11. Мажиев Х.Н., Пшеничкина В.А., Габова В.В., Кузнецов Д.Г., Мажиев К.Х., Мажиев А.Х. Применение метода организованного увлажнения лессовых оснований после возведения коробки зданий на просадочных грунтах в г Грозном. В: *Труды международной конференции «Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения»*. Курск: Курский государственный университет; 2021. С. 99–111. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_47478164_78634011.pdf (дата обращения: 29.03.2024).

Mazhiev KhN, Pshenichkina VA, Gabova VV, Kuznetsov DG, Mazhiev K.Kh, Mazhiev AKh. Application of the Method of Organised Moistening of Loess Soil Bases after the Construction of a Building Framworks on Subsident Soils in Grozny. In: *Proceedings of the International Academic Readings "Safety of the Russian Construction Fund. Problems and Solutions"*. Kursk: Kursk State University; 2021. P. 99–111. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_47478164_78634011.pdf (accessed: 29.03.2024). (In Russ.).

Об авторе:

Дежина Ирина Юрьевна, доцент кафедры «Технология строительного производства» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ScopusID, ORCID, irdezhina@yandex.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 29.03.2024
Поступила после рецензирования 10.04.2024
Принята к публикации 22.04.2024

About the Author:

Irina Yu. Dezhina, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Construction Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ScopusID, ORCID, irdezhina@yandex.ru

Conflict of Interest Statement: the author does not have any conflict of interest.

All author has read and approved the final manuscript.

Received 29.03.2024
Revised 10.04.2024
Accepted 22.04.2024

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА
TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION

CC BY

Check for updates

Оригинальное эмпирическое исследование

УДК 624.154.8
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-2-33-41

Оценка конкурентоспособности способов устройства уширений буровых свай при возведении фундаментов многоэтажных зданий

С.Г. Османов ✉, **А.Э. Иняхин**
Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ osmanov.tsp@ya.ru

EDN: OLEYQL

Аннотация

Введение. Буровые сваи — наиболее адаптированный к особенностям многоэтажного строительства тип свай. В статье рассмотрены существующие способы устройства уширений таких свай как основного инструмента минимизации их диаметра, длины и количества, а значит упрощения и снижения издержек проектирования и последующего возведения фундаментов. Установлено, что при известном многообразии этих способов информация о них разрозненна, запутанна, а порой и противоречива, что затрудняет выбор оптимальных проектных решений. Для его облегчения предложена прикладная классификация рассматриваемых способов, и поставлена цель уточнения областей их рационального применения.

Материалы и методы. В исследовании использованы данные сборников производственных и сметных норм, справочной, нормативной и типовой проектной документации, а также отечественный опыт и предложения специализированных подрядных организаций. В ходе анализа этих материалов произведена систематизация сведений о преимуществах, недостатках и параметрах областей применения существующих способов устройства уширений буровых свай по критериям внутренних и внешних факторов выбора соответствующих решений в конкурентных условиях многоэтажного строительства. Конкурентоспособность трех наиболее перспективных из таких способов исследована методом комплексной (многокритериальной) оценки.

Результаты исследования. Установлено, что в рассмотренных обобщенных условиях самым конкурентоспособным среди отобранных способов является, как правило, разрядно-импульсная обработка ствола и (или) пяты свай. При этом соответствующие результаты представлены графически в виде столбчатых диаграмм удельных трудозатрат и стоимости устройства уширений исследованными способами и радиальных диаграмм совокупного влияния этих критериев, наряду с прочими учтенными, на решение поставленной оптимизационной задачи.

Обсуждение и заключение. Развиты соображения об эффективности применения полученных результатов в современном проектировании, а также показано, как и при каких обстоятельствах они могли бы меняться с учетом конкретизации проектных данных и местных условий строительства, что в целом позволило уточнить области рационального применения рассмотренных способов и дать рекомендации по обновлению соответствующей нормативной базы.

Ключевые слова: многоэтажные здания, буровые сваи, уширения, механический способ, взрывной способ, разрядно-импульсная обработка, конкурентоспособность, внутренние факторы, внешние факторы, комплексная оценка

Для цитирования. Османов С.Г., Иняхин А.Э. Оценка конкурентоспособности способов устройства уширений буровых свай при возведении фундаментов многоэтажных зданий. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(2):33–41. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-2-33-41

© Османов С.Г., Иняхин А.Э., 2024

Original Empirical Research

Evaluating the Competitiveness of the Methods of Bored Cast-in-Place Piles Underreaming when Construct-ing the Foundations of Multistorey Buildings

Sergey G. Osmanov ✉, **Alexander E. Inyakhin**
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ osmanov.tsp@ya.ru

Abstract

Introduction. The bored cast-in-place piles are the type of piles most adjusted to specifics of the multistorey building construction. The article studies the existing methods of underreaming such piles as the main tool to minimise their diameter, length, and quantity, thus optimise and reduce the cost of foundation design and its subsequent construction. It is acknowledged that despite the diversity of these methods, the information about them is scattered, confusing, and sometimes contradictory, making it difficult to choose the optimal design solutions. To facilitate the choice, an application-oriented classification of the methods under study has been proposed aiming to specify the areas of rational implementation thereof.

Materials and Methods. The study took into account the data of the guidebooks on norms of production and estimate norms, the reference, normative and standard design documentation, as well as national practices and solutions proposed by the professional subcontracting organisations. Upon analysis of the above materials, the information on the advantages, disadvantages and implementation area parameters of the existing methods of bored cast-in-place piles underreaming was systematised based on the internal and external factor criteria used for selecting the appropriate solutions in the competitive conditions of multistorey building construction. The competitiveness of three most advanced of such methods was investigated by a comprehensive (multi-criteria) evaluation method.

Results. It was found that under general conditions that were studied, the most competitive among the selected methods was mainly the pulse-discharging treatment of a pile shaft and (or) pile base. The respective results were presented graphically in the form of the bar charts of unit labour costs and costs of underreaming by the studied method, as well as the radial bar charts showing the cumulative effect of these and other taken into account parameters on solving the set task of optimisation.

Discussion and Conclusion. The reflections upon the efficiency of implementing the obtained results in the present-day designing have been further evolved, and the ways and circumstances of changing thereof depending on the project specification and local conditions of construction have been presented. On the whole, that allowed for specifying the areas of rational implementation of the studied methods and providing the recommendations on updating the relevant regulatory framework.

Keywords: multistorey buildings, bored cast-in-place piles, underreaming, mechanical method, explosive method, pulse-discharging treatment, competitiveness, internal factors, external factors, comprehensive evaluation

For citation. Osmanov SG, Inyakhin AE. Evaluating the Competitiveness of the Methods of Bored Cast-in-Place Piles Underreaming when Constructing the Foundations of Multistorey Buildings. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024;3(2):33–41. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-2-33-41

Введение. При возведении многоэтажных зданий, особенно повышенной этажности и высотных, их плитно-свайные фундаменты чаще всего устраивают с применением буровых свай (далее — БС), преимущества которых в полной мере соответствуют основным вызовам современного многоэтажного строительства [1–3]. В связи с этим является весьма значимой возможность назначения размеров таких свай в широких пределах (например, диаметра/длины для свай круглого сечения — от 0,15/3 до, соответственно, 2/70 м и даже более), что позволяет [2, 3] гибко и эффективно решать проблему больших нагрузок от веса зданий на основания. К БС, разумеется, относятся и бареттные сваи (прямоугольные в сечении, изготавливаемые в грунте с помощью плоских грейферов), и они могут выигрывать у круглых (буронабивных и буроинъекционных) в несущей способности, однако являются, как было установлено, не менее чем на 20 % более трудозатратными в изготовлении и используются в основном лишь при возведении уникальных объектов. Отчасти этому способствует возможность дополнительного повышения несущей способности круглых БС рядом способов [4], к которым зачастую приходится прибегать, т.к. имеющие место большие диаметр/длина свай и их малый шаг приводят на практике к ряду весьма существенных затруднений и издержек, причем как расчетно-конструкторского, так и организационно-технологического толка.

Первые обусловлены большими значениями расхода конструкционных материалов, а также (в ряде случаев) высокой трудоемкостью и стоимостью проектирования фундамента. Вторые — повышенной сложностью увязки работы задействованных в стесненных условиях машинокомплектов и отдельных многофункциональных установок (далее — МФУ) и вспомогательных машин в их составе, а также увеличением срока строительства из-за

ограниченной возможности вести работы поточно в связи с необходимостью соблюдения указаний по их совмещению, регламентированных СП 45.13330.2017 «Земляные сооружения, основания и фундаменты» (выполнять бетонирование свай не позже 24/8 часов после окончания бурения под них скважин в устойчивых/неустойчивых грунтах соответственно) и СП 412.1325800.2018 «Конструкции фундаментов высотных зданий и сооружений. Правила производства работ» (не разбуривать скважины на расстоянии менее 4-х их диаметров от центров ранее изготовленных смежных свай до набора бетоном последних 50 % проектной прочности). Выполнение указанных условий и компенсация сопряженных рисков — непростая инженерная задача на любом объекте, тем более с учетом его масштабности и сложности.

Наиболее рациональным решением, позволяющим минимизировать описанные сложности, является проектирование круглых БС с уширением ствола и (или) пяты, что, собственно, и повышает несущую способность каждого элемента свайного поля, увеличивает их шаг, обеспечивая потенциал для рассредоточения свайных работ по фронту и их гибкой поточной организации [2, 4, 5]. Оправданность применения этого решения во многом зависит от того, каким способом оно будет реализовано, и как при его выборе учтены внешние (обусловленные местными условиями строительства) и внутренние (производственные) факторы. Поэтому исследование особенностей и возможностей существующих способов устройства уширений БС представляется весьма актуальным.

На сегодняшний день разработано множество таких способов. Однако, как было установлено, доступная информация о них довольно разрознена, запутана, а иногда (например, при соотнесении их применимости с инженерно-геологическими условиями (далее — ИГУ) выделенного участка и плотностью окружающей застройки) даже противоречива. Во многом это обусловлено как незрелостью рынка строительных технологий, проявляющейся в необоснованности применения одного из способов (как правило, наиболее дорогостоящего), так и неполнотой либо банальной утратой актуальности некоторой нормативной, методической и типовой проектной документации по рассматриваемой тематике. Представленная на рис. 1 в виде блок-схемы прикладная классификация существующих способов устройства уширений БС, предложенная авторами по результатам соответствующего анализа, устанавливает связь конкретных способов с реализуемой ими формой уширений свай (влияющей на их несущую способность [4]), а также действующим нормативным обеспечением, способствуя большей ясности на начальном этапе проектирования. Причем любопытно, что только разрядно-импульсная обработка (далее — РИО) регламентирована отдельным документом.

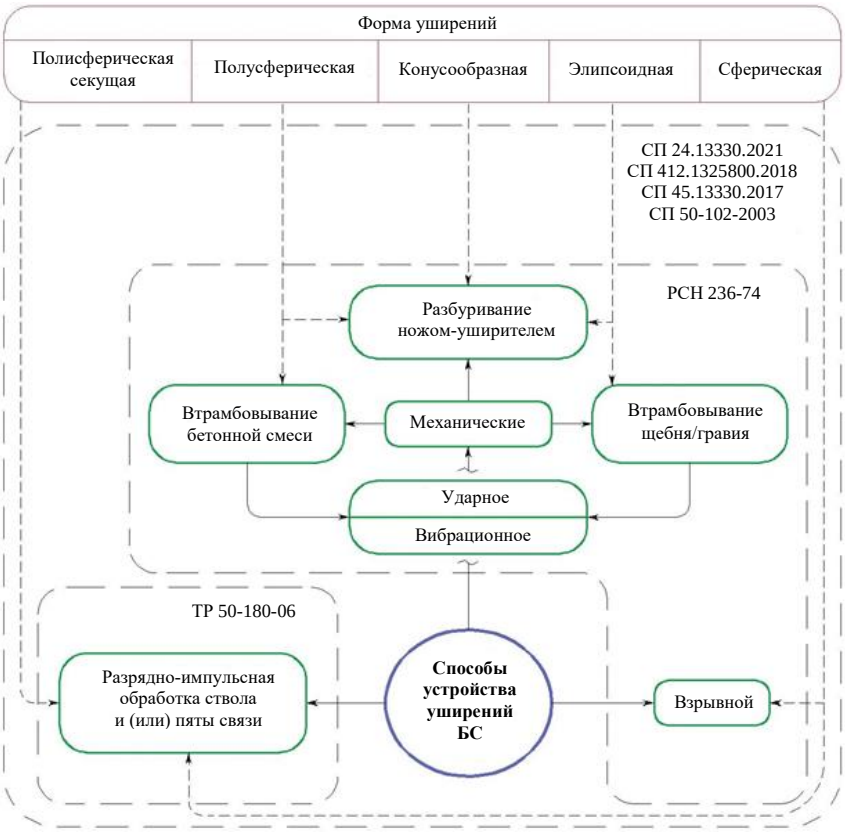


Рис. 1. Предложенная классификация и нормативное обеспечение существующих способов устройства уширений БС

Как видно из вышеизложенного, выбор оптимального способа устройства уширений БС нередко весьма осложнен, и для его некоторого облегчения авторами поставлена цель уточнения областей рационального применения данных способов, в т.ч. на основе результатов оценки конкурентоспособности наиболее значимых из них для практики многоэтажного строительства в спектре условий, когда такой выбор наиболее неочевиден. Это позволило бы повысить качество проектирования свайных фундаментов и работ, а также сократить его сроки.

Материалы и методы. Анализируя справочную и нормативную документацию по исследуемой проблематике, равно как и соответствующий отечественный опыт строительства, авторы пришли к выводу, что для грамотного выбора способа устройства уширений БС в общем случае достаточно, в зависимости от назначения, уровня ответственности и конструктивных особенностей возводимого объекта, учесть совокупное влияние и приоритетность как минимум 8 локальных критериев (C_i), поровну распределенных между внешними и внутренними факторами. При этом в увязке с такими критериями удалось обобщить, дополнить и затем систематизировать известные представления о преимуществах, недостатках и параметрах областей применения рассматриваемых способов, результаты чего (таблица 1) могут быть полезны в качестве инструментария предварительного обоснования выбора соответствующих проектных решений.

Так, например, уже из этих данных нетрудно понять, что самые существенные для многоэтажного строительства недостатки имеют способы, основанные на втрамбовывании. Следует особо обратить внимание на отсутствие нормативных методик задания нужной геометрии и оценки несущей способности получаемых таким образом уширений из-за невозможности достоверно судить о характере [6] их взаимодействия с основанием. Для компенсации этой неопределенности приходится закладывать в проект повышенное значение соответствующего коэффициента запаса, но едва ли такое решение можно назвать оптимальным в случае доступности иных вариантов, особенно при возведении многофункциональных зданий и комплексов как повышенной этажности, так и высотных.

Поэтому способы, связанные с глубинным трамбованием, из последующего анализа исключены, тогда как оставшиеся (разбуривание ножом-уширителем (далее — механический), взрывной и РИО) для названной выше категории объектов при их классе КС-2 по ГОСТ 27751–2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения» признаны наиболее значимыми (основными), выбор между ними — неочевидным, а его условия при устройстве БС небольшого диаметра и средней длины (до 0,4÷0,5 и 30÷35 м соответственно), висячих, в связных грунтах с I_L = 0,3÷0,7 на участках со средней плотностью застройки — наиболее конкурентными. Именно в такой, более конкретизированной, постановке методом комплексной (многокритериальной) оценки [7] исследована конкурентоспособность указанных трех способов, и в качестве обобщенного критерия ее предпочтительного уровня, учитывая существенную степень неопределенности, выбран адаптированный максиминный критерий Вальда, часто называемый «пессимистическим»:

$$W = \max_i \min_j \sum \left(C^E_{i,\,NC}; \bar{C}^I_{NC} \right),$$

где $C^E_{i,\,NC}$ и $\bar{C}^I_{NC}$ — соответственно откорректированные нормализованные значения C^E_i и аналогично преобразованные, а затем подвергнутые свертке (путем осреднения для каждого *j*-го способа) значения C^I_i, имеющие в рассматриваемом общем случае в целом несколько меньшую весомость.

Корректировка нормализованных величин $C_{i,\,N}$ для всех локальных критериев произведена с учетом их приоритетности *p* по формуле:

$$C_{i,\,NC} = 1 - (1 - C_{i,\,N})\,p,$$

тогда как процедура нормализации для критериев с установленными тенденциями возрастания (C^E_1, C^E_2, C^I_3 и C^I_4) и убывания (C^I_1, C^I_2, C^E_3 и C^E_4) при стремлении к оптимуму — соответственно по формулам:

$$C_{i\uparrow,\,N} = C_{i\uparrow} \Big/ \max_j \left(C_{ij\uparrow} \right) \text{ и } C_{i\downarrow,\,N} = \min_j \left(C_{ij\downarrow} \right) \Big/ C_{i\downarrow},$$

что, в свою очередь, позволило привести для удобства все задействованные критерии к единой тенденции и выразить их значения в долях единицы.

https://www.stsg-donstu.ru

Таблица 1

Систематизация сведений о преимуществах, недостатках и параметрах областей применения исследуемых способов по критериям внешних и внутренних факторов их выбора в многоэтажном строительстве

Локальные критерии		Механические способы						Взрывной способ		РИО	
		Разбуривание ножом-уширителем		Втрамбовывание бетонной смеси		Втрамбовывание щебня/гравия					
Внешних факторов	Применимость в зависимости от плотности застройки, C_1^E	+	Не ограничена (при наличии места для маневрирования бура МФУ)	–	Зависит от итогов предварительной оценки допустимости уровня шума и динамических воздействий на здания/инженерные сети ближе 20÷25/10÷15 м		–	То же, не ближе расстояния, рассчитываемого по РСН 263-74	±	Ограничена необходимостью мониторинга допустимости в ходе работ скоростей амплитуд колебаний объектов ближе 10 м
	Применимость в зависимости от особенностей ИГУ участка, C_2^E	+	Повышенная (в приоритете/ допустим связный/ неустойчивый грунт)	±	Средняя (в приоритете несвязные грунты средней плотности и связные с показателем текучести $I_L = 0{,}4 \div 0{,}5$)		–	Низкая (связный ($I_L \leq 0{,}5$) устойчивый грунт в приоритете)	+	Высокая (не подходит для грунтов с напорными водами, илов, торфянников, иногда скальных и крупнообломочных)
	Опасность для окружающей застройки, C_3^E	+	Низкая	–	Повышенная		–	Высокая	±	Средняя	
	Травмоопасность, C_4^E	+	Пониженная	±	Средняя		–		–	Повышенная	
Внутренних факторов	Трудоемкость, C_1^I	–	Повышенная (из-за цикличности чистки бура/скважины)	–	Высокая, из-за больших количества и (или) длительности циклов втрамбовывания		+	Низкая (при шаге БС более радиуса сотрясения)	±	Средняя (получение отказов часто требует цикличной подачи разрядов в бетонную смесь)	
	Удельная стоимость, C_2^I	±	Средняя	–	Повышенная (из-за большой мощности ведущей машины)		+	Низкая	–	Повышенная (из-за дороговизны материалов и механизации работ)	
	Возможность выбора геометрии уширения, C_3^I	+	Есть (задаются форма и размеры)	–	Нет (достоверная методика отсутствует)		±	Есть (задается только диаметр)	+	Есть, в любой части БС (задаются форма и диаметр)	
	Возможность оценки и гарантии несущей способности, C_4^I	±	Есть (методикой не учтена вариативность формы уширения)	–			+	Есть (расчетная методика регламентирована)			
					Сопутствуют повышению несущей способности из-за уплотнения грунта вблизи уширений						
Примечание: «+» и «–» — соответственно преимущества и недостатки рассмотренных способов, их ранжирование между собой дано по 5 уровням											

Средние трудозатраты и стоимость устройства уширений БС интересующими способами определены в универсальных удельных величинах (из расчета на 1 м^3 сваи соответствующего исполнения) на основе анализа сборников ЕНиР, ГЭСН, типовой организационно-технологической проектной документации, а также общедоступных производственных данных и расценок в составе коммерческих предложений подрядных организаций г. Москвы и Московской области, занимающихся проектированием и производством рассматриваемых свайных работ. В то же время методом экспертных оценок на основе средневзвешенных результатов дистанционного опроса инженерно-технических работников этих фирм установлены величины p и оцифрованы все прочие (неисчисляемые) критерии C_i в диапазонах 0÷1 и 0÷10 соответственно.

Результаты исследования. Полученные значения исчисляемых критериев (C_1^I и C_2^I) для большей наглядности представлены графически в виде столбчатых диаграмм (рис. 2). Аналогично в виде радиальных диаграмм (рис. 3) — комплексное влияние этих и прочих исследованных критериев на выбор наиболее конкурентоспособного способа устройства уширений БС с учетом введенных авторами ограничений, что справедливо при установленных величинах p, составивших 1,0; 0,7; 0,5; 0,3; 0,8; 1,0; 0,4 и 0,6 для критериев C_1^E, C_2^E, C_3^E, C_4^E, C_1^I, C_2^I, C_3^I и C_4^I соответственно.

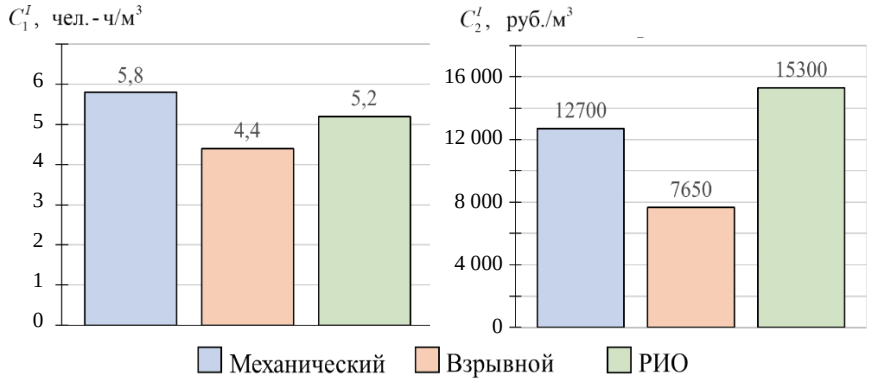
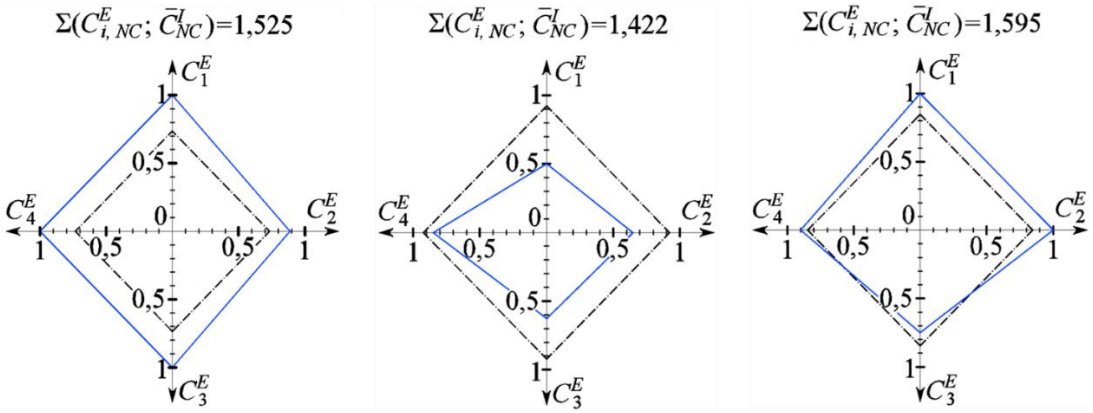


Рис. 2. Сопоставление трудоемкости и удельной стоимости реализации основных способов устройства уширений БС



а) *б)* *в)*

Рис. 3. Влияние внешних и внутренних факторов ($C^E_{i,NC}$ и $\bar{C}^I_{NC}$ — сплошная синяя и прерывистая черная линии соответственно) на конкурентоспособность исследованных способов: *а* — механический; *б* — взрывной; *в* — РИО

Таким образом, из рис. 3 видно, что значение W в рассмотренных обобщенных условиях достигается при устройстве уширений по способу РИО, а значит именно его и следует в подобных случаях рекомендовать к применению в первую очередь. Однако в конкурентоспособности ему механический способ, а вслед за ним и взрывной (по ниспадающей примерно с тем же шагом, равным в среднем ~0,09), уступают достаточно мало, что, с одной стороны, подтверждает правильность выбора условий решенной оптимизационной задачи, а с другой стороны, свидетельствует о высокой на сегодняшний день степени взаимозаменяемости исследованных способов, а также определяющей роли при их окончательном выборе дополнительных критериев и (или) прочих условий, более детально и точно конкретизирующих особенности реализуемого проекта. При этом в зависимости от их сочетания и уровня детализации может даже

https://www.stsg-donstu.ru

потребоваться некоторая корректировка примененной расчетной методики, например, в части свертки значений критериев не внутренних, а внешних факторов.

Обсуждение и заключение. На основе анализа полученных результатов и сопоставления их с опытом современного многоэтажного строительства можно сделать вывод о целесообразности более широкого применения БС с уширениями, полученными путем РИО. Главным препятствующим этому фактором является повышенная себестоимость таких свай (в среднем примерно на 20 % больше, чем при использовании механического способа) из-за дороговизны бетона, отличающегося в данном случае большим расходом цемента и модификаторов, а также высокой стоимости и энергоемкости электровзрывного оборудования. Однако следует понимать, что поскольку РИО гораздо чаще производится при учтенном в исследовании буроинъекционном исполнении БС, чем при традиционном [8, 9] буронабивном, то в целом (т.е. из расчета на весь объем работ) как по трудо-, так и по материалоемкости соответствующие конструктивно-технологические решения являются гарантированно выгоднее, чем применение существенно больших по диаметру буронабивных свай с разбуриваемыми уширениями. Последние, ко всему прочему, весьма сложны по изготовлению в неустойчивых, в т.ч. водонасыщенных, грунтах из-за необходимости постоянно работать под защитой глинистого раствора и начинать бетонирование не позже 2÷4 часов после промывки уширений, что вынуждает выполнять все основные процессы, включая устройство скважин и армирование, последовательным методом.

Кроме того, следует обратить внимание на характерные для РИО, в отличие от прочих исследованных способов, возможность и простоту операционного контроля и корректировки качества свайных работ в части обеспечения заданных проектом геометрии и несущей способности свай с помощью гибкой методики обработки забоя до «отказа». Механический способ такой возможности, по сути, лишен, а номенклатура и число типоразмеров буров, выпускаемых промышленностью довольно ограничены. Взрывной же способ в основном предполагает мгновенное образование уширений, после чего что-либо исправить на практике зачастую уже едва ли возможно. Повторное камуфлетирование значительно увеличивает значения критериев C_1^I и C_2^I, а групповое и кольцевое и вовсе целесообразно рассматривать лишь при изготовлении БС диаметром более 1 м.

В то же время нельзя не отметить, что как субъективно, так и особенно на нормативном уровне взрывной способ на сегодняшний день сильно недооценен. Например, уже разработаны и активно продвигаются его современные усовершенствованные варианты, учтенные в данном исследовании, основанные на выполнении микровзрывов под слоем самоуплотняющейся бетонной смеси, что весьма эффективно при устройстве БС небольших диаметров (причем даже существенно менее 0,4 м, вопреки РСН 263-74) в более стесненных, чем допускалось ранее, условиях, т.к. по степени опасности для окружающей застройки и задействованного персонала это вполне сопоставимо с процессами забивки и вибропогружения готовых свай. Столь существенное расширение диапазона применимости взрывного способа достигнуто в немалой степени благодаря исключению зависания смеси и пробкообразования в бетонолитной трубе, с чем также ранее нередко приходилось сталкиваться на практике. Поэтому некоторая большая конкретизация условий решенной задачи вполне могла бы вывести в лидеры взрывной способ. Однако здесь полезно иметь в виду, что чем меньше диаметр БС, тем более неизбежен и их малый шаг [10], и если его величина не превысит радиус сотрясения, то из-за необходимости камуфлетирования при этом смежных свай не ранее чем по достижению бетоном соседних 70 % прочности могут резко возрасти трудозатраты. Тем не менее прочие вышеуказанные обстоятельства свидетельствуют о необходимости соответствующего обновления нормативного обеспечения взрывного способа.

Результаты и глубина выполненного исследования также вполне позволяют прогнозировать возможные изменения решения рассмотренной задачи не только при уточнении, но и при выходе значений проектных параметров и местных условий строительства за установленные авторами пределы. Так, при возведении многоэтажных зданий на участках с пониженной и тем более низкой плотностью застройки и (или) грунтами с $I_L < 0{,}3$ в уровне пят БС, в т.ч. диаметром свыше 0,5 м, самым конкурентоспособным способом устройства их уширений был бы взрывной.

В то же время при проектировании свай-стоек либо диаметрах или длине БС более 0,5 и 35 м соответственно, равно как и при классе возводимых объектов КС-3 по ГОСТ 27751–2014 (вопреки ТР 50-180-06), наибольшей конкурентоспособностью из исследованных способов обладал бы механический. Ведь с одной стороны, относительно высокая несущая способность свай с уширениями, полученными путем РИО, обусловлена в основном их множественностью и сложной полисферической формой — это выгодно для висячих свай, тогда как для свай-стоек особой значимости не имеет. С другой стороны, увеличенные диаметр и длина БС исключают возможность работы в ресурсоэффективном буроинъекционном исполнении и тем самым сильно сказываются не только на росте значений C_2^I, но и на самой возможности электровзрывной проработки соответствующего забоя.

Наконец, анализ современного опыта многоэтажного строительства показывает, что у БС с РИО пяты и ствола (характерного его малого диаметра) несущая способность по материалу сваи значительно выше, чем по грунту, что, хоть и допустимо, может весьма негативно сказываться на надежности и долговечности плитно-свайных фундаментов зданий повышенного уровня ответственности, в т.ч. высотных и уникальных, срок службы которых, как известно, должен быть не менее 100 лет. Именно поэтому область применения ТР 50-180-06 нуждается в корректировке.

Изложенные выше соображения уточняют области рационального применения исследованных авторами способов, в связи с чем очевидно, что применение полученных результатов в современной практике строительного проектирования позволит в ряде случаев уже на довольно ранних его этапах в короткие сроки, без проведения трудоемкого технико-экономического анализа, принимать наиболее конкурентоспособные и обоснованные варианты устройства уширений БС в составе фундаментов многоэтажных зданий. Соответствующая же актуализация изученной нормативной, методической и типовой проектной документации может не только этому значительно поспособствовать, но и сильно повысить привлекательность рассмотренных конструктивно-технологических решений.

Список литературы / References

1. Бородина Е.Д., Кузнецова Е.В. Устройство буронабивных свай в условиях Оренбуржья в зимний период. *Международный научно-исследовательский журнал.* 2022;120(6):12–17. https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.003

Borodina ED, Kuznecova EV. Bored Piles Structure in the OrenBurg Region in Winter. *International Research Journal*. 2022;120(6):12–17. https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.120.6.003 (In Russ.).

2. Готман А.Л., Гавриков М.Д. Исследование особенностей работы вертикально нагруженных длинномерных буронабивных свай и их расчет. *Construction and Geotechnics.* 2021;12(3):72–83. https://doi.org/10.15593/2224-9826/2021.3.08

Gotman AL, Gavrikov MD. Calculation of a Large-Size Bored Pile on a Vertical Load. *Construction and Geotechnics*. 2021;12(3):72–83. https://doi.org/10.15593/2224-9826/2021.3.08 (In Russ.).

3. Соснин А.В., Абросов А.А. Влияние точности определения перемещений буронабивных свай на результаты анализа их реакции от действия горизонтальных нагрузок. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура»*. 2022;22(4):15–32. URL: https://clck.ru/3AHPns (дата обращения: 01.02.2024).

Sosnin AV, Abrosov AA. Influence of Displacements Determination Accuracy of Bored Piles on Analysis Results of Their Response under Lateral Loads. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. "Construction Engineering and Archi-tecture"*. 2022;22(4):15–32. URL: https://clck.ru/3AHPns (accessed: 01.02.2024). (In Russ.).

4. Купчикова Н.В. О факторах, влияющих на надежность свайных фундаментов с уширениями. *Инженерно-строительный вестник Прикаспия.* 2021;37(3):54–61. https://doi.org/10.52684/2312-3702-2021-37-3-54-61

Kupchikova NV. On the Factors Affecting the Reliability of Pile Foundations with Widenings. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. 2021;37(3):54–61. https://doi.org/10.52684/2312-3702-2021-37-3-54-61 (In Russ.).

5. Ушакова Е.А. Применение детерминистических и стохастических моделей для анализа организационно-технологической последовательности возведения буронабивных свай. *Современное строительство и архитектура.* 2022;27(3):29–34. https://doi.org/10.18454/mca.2022.27.4

Ushakova EA. Application of Deterministic and Stochastic Models for the Analysis of the Organizational and Technological Sequence of the Construction of Bored Piles. *Modern Construction and Architecture*. 2022;27(3):29–34. https://doi.org/10.18454/mca.2022.27.4 (In Russ.).

6. Картопольцев В.М., Картопольцев А.В., Алексеев А.А. К вопросу совершенствования штамповых испытаний грунта в основании буронабивных свай при строительстве опор мостов. *Вестник ТГАСУ*. 2023;25(2):207–222. https://doi.org/10.31675/1607-1859-2023-25-2-207-222

Kartopoltsev VM, Kartopoltsev AV, Alekseev AA. Improvement of Soil Plate-Bearing Test of Drilled Pile Foot during Bridge Support Construction. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta (Journal of Construction and Architecture)*. 2023;25(2):207–222. https://doi.org/10.31675/1607-1859-2023-25-2-207-222 (In Russ.).

7. Жолобов А.Л., Жолобова Е.А. Комплексная оценка конкурентоспособности строительных технологий. *Инженерный вестник Дона.* 2013;2. URL: http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1705 (дата обращения: 06.02.2024).

Zholobov AL, Zholobova EA. Complex Evaluation Competitiveness of Construction Technologies. *Engineering Journal of Don*. 2013;2. URL: http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1705 (accessed: 06.02.2024). (In Russ.).

8. Снежков Д.Ю., Леонович С.Н., Будревич Н.А. Однородность ствола буронабивных свай по результатам четырехканального межскважинного ультразвукового мониторинга. *Наука и техника.* 2023;22(3):216–223. https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-216-223

Snezhkov DYu, Leonovich SN, Budrevich NA. Homogeneity of Bored Piles According to Results of Four-Channel Cross-Well Ultrasonic Monitoring. *Nauka i tehnika (Science & Technique)*. 2023;22(3):216–223. https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-216-223 (In Russ.).

9. Попов Д.В., Савинова Е.В. Метод расчета устойчивости стенок буровой скважины при устройстве буронабивных свай. *Construction and Geotechnics.* 2020;11(1):62–67. https://doi.org/10.15593/2224-9826/2020.1.06

Popov DV, Savinova EV. Method for Calculating the Stability of the Walls of a Drilling Well when Installing Bored Piles. *Construction and Geotechnics.* 2020;11(1):62–67. https://doi.org/10.15593/2224-9826/2020.1.06 (In Russ.).

10. Yang T, Men Y, Rutherford CJ, Zhang Z. Static and Dynamic Response of Micropiles Used For Reinforcing Slopes. *Applied Sciences.* 2021;11(14):6341. https://doi.org/10.3390/app11146341

Об авторах:

Османов Сергей Гарунович, доцент кафедры «Технология строительного производства» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID, osmanov.tsp@ya.ru

Иняхин Александр Эдуардович, студент кафедры «Технология строительного производства» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, alexandrinyahin@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

С.Г. Османов: научное руководство, формирование основной концепции, цели, задач исследования и его общее планирование, участие в реализации исследования, анализ его результатов, доработка и развитие выводов, глубокое редактирование текста, корректировка оформления рукописи.

А.Э. Иняхин: участие в планировании исследования и реализация его основных этапов, проведение расчетов, обработка и анализ полученных результатов, формулировка выводов, подготовка иллюстраций, первоначального текста и общее оформление рукописи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 05.04.2024
Поступила после рецензирования 23.04.2024
Принята к публикации 10.05.2024

About the Authors:

Sergey G. Osmanov, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Construction Operation Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, osmanov.tsp@ya.ru

Alexander E. Inyakhin, Student of the Construction Operation Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, alexandrinyahin@gmail.com

Claimed Contributorship:

Osmanov SG: scientific supervision, formulating the main concept, aim and objectives of the study and its general planning, participation in the research implementation, analysis of the research results, fine-tuning and evolving the conclusions, deep text editing, correcting the format of the manuscript.

Inyakhin AE: participating in research planning and carrying out its main stages, making the calculations, processing and analysing the results obtained, formulating the conclusions, preparing the illustrations, draft of the text and general formatting of the manuscript.

Conflict of Interest Statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Received 05.04.2024
Revised 23.04.2024
Accepted 10.05.2024

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА
TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION

CC BY

Check for updates

Оригинальное эмпирическое исследование

УДК 69.05
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-2-42-49

EDN: SMSTPY

Анализ особенностей строительной отрасли Китая и тенденции ее развития

У Шисяо ✉, **С.Г. Шеина**, **В.В. Белаш**
Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ 1264950586@qq.com

Аннотация

Введение. Строительная отрасль относится к той области материального производства, которая занимается исследованиями, проектированием, строительством и обслуживанием зданий и сооружений. Строительную отрасль можно разделить на четыре основных сектора: жилищное, инфраструктурное, промышленное строительство и профессиональный инжиниринг. Целью настоящего исследования является определение проблемных сторон и аспектов строительной отрасли Китая.

Материалы и методы. Инструментом для решения поставленной задачи является сравнительный анализ характеристик строительной отрасли и ее исторического развития, а также анализ существующих проблем и тенденций развития.

Результаты исследования. В результате проведенных исследований определены характерные особенности строительной отрасли Китая и обозначены ключевые проблемы. В статье определены наиболее перспективные тенденции развития строительной отрасли.

Обсуждение и заключение. Для преодоления сложившихся проблем в строительной сфере Китая определены основные мероприятия, стимулирующие развитие отрасли путем инвестирования средств в технологические исследования и разработки, с учетом зарубежного опыта для взаимной выгоды и общего развития.

Ключевые слова: строительная отрасль, строительные предприятия, классификация строительных компаний, тенденции развития, передовые технологии

Благодарности. Авторы благодарят анонимных рецензентов, а также выражают признательность руководству за помощь, оказанную в процессе подготовки проекта.

Для цитирования. Шисяо У, Шеина С.Г., Белаш В.В. Анализ особенностей строительной отрасли Китая и тенденции ее развития. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(2):42–49. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-2-42-49

Original Empirical Research

Analysis of the Chinese Construction Industry Features and Trends of Development

Wu Shixiao ✉, **Svetlana G. Sheina**, **Vladimir V. Belash**
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉1264950586@qq.com

Abstract

Introduction. The construction industry belongs to the branch of material production focused on research, design, construction and maintenance of buildings and structures. It can be divided into four main sectors: housing, construction of infrastructure, industrial construction and professional engineering. The aim of the present research is to identify the challenging issues and aspects in the construction industry of China.

Materials and Methods. The comparative analysis of the construction industry features and historical evolvement, as well as the analysis of the existing problems and trends in its development served a tool for solving the objective set forth.

© Шисяо У, Шеина С.Г., Белаш В.В., 2024

Results. The conducted research made it possible to define the distinctive features of the Chinese construction industry and revealed its major problems. The article identified the most forward-looking trends in development of the construction industry. ***Discussion and Conclusion.*** To overcome the problems existing in the construction industry of China, the main moves to encourage the development of the industry by investing funds into the technological research and findings have been identified, which lead to mutual benefit and global development taking into account the foreign experience.

Keywords: construction industry, construction companies, classification of construction companies, trends of development, advanced technologies

Acknowledgments. The authors would like to thank the anonymous reviewers, and express their gratitude to the management for assistance in preparing the paper.

For citation. Wu Shixiao, Sheina SG, Belash VV. Analysis of the Chinese Construction Industry Features and Trends of Development. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024;3(2):42–49. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-2-42-49

Введение. Строительная отрасль является отраслью материального производства, обеспечивающей не только базовую потребность людей в жилье, но и являющейся основой экономики страны. Строительную отрасль можно разделить на четыре основных сектора: жилищное строительство, инфраструктурное строительство, промышленное строительство и профессиональный инжиниринг. Сектор жилищного строительства в основном соответствует отраслям жилищного строительства и коммерческого домостроения; сектор инфраструктурного строительства охватывает транспорт, охрану водных ресурсов, муниципальное управление и другие области, включая автомобильные дороги, железные дороги, железнодорожный транспорт, аэропорты, трубопроводы; сектор промышленного строительства включает в себя строительство зданий и сооружений всех отраслей промышленности; другие подразделенные направления строительной отрасли в основном классифицируются по профессиональным инженерным секторам, включая проектирование стальных конструкций, отделку, садоводство, инженерные изыскания, консалтинг, проектирование, сборку, информационные технологии и другие направления[1].

Функция строительной отрасли заключается главным образом в выполнении строительно-монтажных работ с использованием различных строительных материалов и комплектующих, машин и оборудования и т.д., а также в создании производственных и непроизводственных основных фондов для национальной экономики.

Строительные предприятия — элементы строительной индустрии, которые определяют эффективность всей строительной отрасли. В свою очередь, промышленная ситуация и соответствующая окружающая среда оказывают важное влияние на производство различных предприятий, в том числе предприятий, связанных со строительством.

История развития строительной отрасли тесно связано с историей развития самого общества. С древних времен и по настоящее время развитие строительной индустрии тесно связано с ходом истории в Китае.

Материалы и методы. Производство работ в строительной отрасли осуществляется с использованием строительных машин, оборудования и инструментов с целью создания определенной продукции, что придает ему характеристики промышленного производства. Однако оно обладает многими техническими и экономическими характеристиками, отличающимися от общепромышленного производства, и поэтому является самостоятельным сектором материального производства.

Основными характеристиками производства работ в строительной отрасли являются закрепление на земле и невозможность перемещения; сложность; масштабность; долговечность, длительный срок службы.

Эти характеристики обусловили ряд особенностей строительного производства.

Во-первых, текучесть производства. Производственный персонал и оборудование и даже вся строительная организация должны перемещаться в соответствии с изменениями местоположения строительного объекта. Кроме того, в процессе производства строительный персонал и оборудование должны перемещаться вдоль строительного объекта в соответствии с различными строительными площадками, постоянно меняя место эксплуатации. Чтобы адаптироваться к частым изменениям условий строительства, большая часть строительной техники должна быть относительно небольшой и легкой в перемещении, и выполняется больше ручных операций, что в определенной степени повлияло на развитие строительных технологий.

[1] *Классификация отраслей народного хозяйства — 2017 (GB/T 4754-2017).* URL: https://www.stats.gov.cn/xxgk/tjbz/gjtjbz/201710/t20171017_1758922.html (дата обращения 05.04.2024).

Во-вторых, уникальность производства. Из-за различных функциональных требований к зданиям или сооружениям природные условия и социально-экономические условия, в которых они расположены, различны. Каждый проект имеет свой собственный уникальный инженерный проект и дизайн. Стоимость продукции также определяются индивидуально.

В-третьих, длительность производства. Сроки строительства крупных проектов часто исчисляются годами, и подготовка к строительству занимает много времени. Поэтому на производство часто уходит много рабочей силы, материальных ресурсов и средств в течение длительного времени, и невозможно обеспечить полезную продукцию в краткосрочной перспективе.

В-четвертых, существует множество работ под открытым небом и на большой высоте, на которые в значительной степени воздействуют природные климатические условия, оказывающие существенное влияние на качество и безопасность строительства.

Классификация китайских строительных компаний

По формам собственности китайские строительные компании можно разделить на:

1) государственные предприятия;
2) предприятия, находящиеся в коллективной собственности;
3) частные предприятия;
4) совместные предприятия с участием иностранного капитала;
5) предприятия с иностранным капиталом.

По масштабу предприятия выделяют:

1) крупные строительные компании;
2) строительные компании среднего размера;
3) небольшие строительные компании[2].

Анализ развития строительной отрасли Китая неотделим от его истории. Китайская строительная промышленность прошла развитие от первобытного строя до современного социалистического общества.

Древнекитайская архитектура имеет долгую историю. В этот период строительная отрасль Китая претерпевала периодические изменения в связи с процветанием и упадком феодальных династий. Объединение царства Цинь привело к созданию первого централизованного феодального государства в истории Китая. Торговля и ремесленная промышленность быстро развивались, и города процветали. Воссоединение территорий при династиях Цинь и Хань способствовало обмену архитектурной культурой между регионами Китая и заложило основу для развития строительной индустрии в Китае в феодальный период. Во времена династий Юань, Мин и Цин Китай сохранял единство, что способствовало развитию древнекитайской архитектуры. В целом ее можно разделить на: городскую архитектуру (Запретный город), сельскую архитектуру, военную архитектуру (Великая Китайская стена), религиозную архитектуру (дворец Потала), церемониальную архитектуру, ландшафтную архитектуру, водоохранное строительство (Дуцзянъянь), жилую архитектуру.

На рис. 1 приведены самые известные объекты древнекитайской архитектуры.

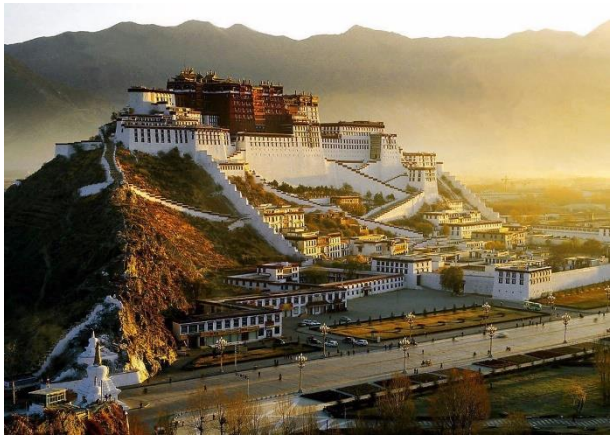
В Китае после Опиумной войны 1840 года официально закончился период существования 2 300-летнего феодального общества. С вторжением империализма и его экономических сил в торговых портах появились иностранные компании, которые привнесли организационную форму и методы ведения бизнеса капиталистической строительной индустрии. Некоторые работники, ранее имевшие контакты с иностранными инвесторами, постепенно стали подрядчиками в строительной отрасли. Самым ранним строительным подрядчиком, появившимся в Шанхае, была строительная фабрика «Ян Руйтай», основанная около 1880 года. В 1891 году компания заключила контракт на строительство таможни Цзянхай в Шанхае [1]. После начала Первой мировой войны национальная промышленность развивалась, а вместе с ней развивалась и строительная отрасль. Было возведено первое высотное здание в Китае — 17-этажное здание Bank of China в Шанхае. Но в целом строительная отрасль Китая значительно отставала от развитых стран.

Новейшая история Китая начинается 1 октября 1949 года, когда Центральное народное правительство Китайской Народной Республики объявило о своем создании. Китайская нация вступила в новую эру социалистического строительства. Ритм развития строительной индустрии Нового Китая соответствует ритму развития Нового Китая. С момента зарождения Нового Китая и по настоящее время строительная отрасль претерпела ряд изменений, постоянно корректируя свои методы развития, внедряя инновации и продвигаясь в ногу со временем, добиваясь быстрого развития.

[2] *Квалификационные стандарты для строительных предприятий.* Министерство жилищного строительства и городского и сельского развития Китайской Народной Республики. URL: https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/201411/20141106_219511.html (дата обращения: 05.04.2024).

а)

б)



в)

г)

Рис. 1. Древнекитайская архитектура: *а* — Запретный город; *б* — Великая Китайская стена; *в* — дворец Потала; *г* — водоохранные сооружения

Процесс развития строительной отрасли в Новом Китае можно условно разделить на шесть этапов:

1. Стадия национальной плановой экономической системы. В начале основания Китайской Народной Республики страна испытывала экономические проблемы и столкнулась с экономической блокадой со стороны западных стран. В стране была принята плановая экономическая система. В этот период энергично развивалась национальная экономика, по всей стране велось крупномасштабное строительство, строительная отрасль быстро расширялась на основе завершения общей планировки, и в этот период в основном были сформированы фундамент и система управления строительной отраслью, которые заложили основу для долгосрочного развития.

2. Стадия системы военизированного управления. В 1960 году по политическим причинам Советский Союз прекратил свою помощь Китаю. Из 304 проектов, которые осуществлялись при поддержке Советского Союза, только 103 были завершены к концу 1960 года, а 201 находились в стадии строительства. Это привело к их замораживанию. Строительная отрасль Китая вступила в стадию независимого и военизированного управления. Центральный комитет партии принял решение сформировать инженерный корпус и расширить железнодорожный корпус. В это время строительная отрасль стала активно перенимать передовые технологии и опыт извне.

3. Стадия управления корпоративными контрактами. В 1978 году Третий пленум Центрального комитета Одиннадцатого созыва принял решение сместить акцент партии и страны на социалистическое экономическое строительство, осуществить реформу и открытость и положил начало реформированию системы управления строительными предприятиями Китая. В течение этого периода строительная отрасль Китая была включена в национальный план развития в качестве опорной отрасли, был опубликован и внедрен план реформы строительной отрасли, была внедрена система управления корпоративными контрактами. Эти меры значительно повысили производительность труда и способствовали развитию строительной отрасли. В августе 1979 года Государственный совет одобрил «Отчет о пилотных мерах по предоставлению займов для инвестиций в капитальное строительство» и приступил к экспериментальному «распределению и модификации займов» в области капитального строительства, изменив предыдущую модель плановой экономики, основанную на бесплатных государственных финансовых ассигнованиях. В апреле 1980 года государство официально предложило предоставить государственным строительным предприятиям автономию в управлении, внедрить систему удержания прибыли, чтобы строительные предприятия оставляли разумную прибыль. В государственных строительных предприятиях

начала внедряться система ответственности бизнеса. В 1983 году строительные предприятия начали внедрять принцип «прибыль в налог». В феврале того же года Министерство строительства выпустило «Набросок реформы строительной отрасли», в котором выдвинуло 10 инициатив по реформе, направленных на развитие системы контрактов на предприятиях. В марте того же года Государственная плановая комиссия и другие ведомства совместно выпустили «Пробные меры по системе экономической ответственности для проектов капитального строительства», которые основывались на масштабах строительства, общем объеме инвестиций, сроках строительства, качестве проекта и расходе материалов, и внедряли систему ответственности руководства, сочетающую «ответственность, право и выгоду». В сентябре 1984 года Госсовет издал «Временные положения по ряду вопросов, касающихся реформы строительной отрасли и системы управления капитальным строительством», в которых было выдвинуто 16 важных инициатив по реформе, включая всестороннее развитие системы ответственности за инвестиции в проекты капитального строительства, активное развитие системы торгов и заключения контрактов на реализацию проектов, а также всестороннее развитие системы ответственности за заключение технико-экономических контрактов. Впоследствии Государственная комиссия по планированию и другие подразделения выпустили ряд нормативных актов и методик, ознаменовавших собой полный запуск реформы строительной отрасли Китая и серьезные изменения в системе управления капитальным строительством.

4. Стадия «проектного метода» в строительстве. 6 августа 1987 года газета «People's Daily» опубликовала на первой странице длинный информационный бюллетень «Влияние «Лубугэ». Премьер Чжао Цзыян и вице-премьер Ли Пэн дали соответствующие указания о продвижении опыта управления проектами «Лубугэ», что дало старт реформе способа производства в строительной отрасли Китая и системы управления строительными проектами. В 1987 году была учреждена «Премия Любань для строительных проектов Китая (Национальная премия за высококачественные проекты)». Учреждение премии «Любань» способствовало улучшению возможностей предприятий по управлению качеством, повысило социальный авторитет, популярность и мотивацию предприятий, удостоенных премии, а также способствовало повышению уровня качества проектов во всей отрасли.

5. Стадия «юридическое лицо управляет проектом». В 2001 году Сунь Вэньцзе, генеральный директор China Construction, впервые выдвинул концепцию «юридическое лицо управляет проектом». Эта модель основана на «трех центрах»: централизованном управлении фондами; централизованной закупке материалов; централизованных торгах на трудовые услуги.

Благодаря управлению «тремя центрами» предполагалось добиться совершенствования управления системой предприятия, а также централизации и интенсификации управления юридическим лицом. Концепции управления региональной деятельностью, специализированного развития, усовершенствованного управления и международной синергии, выдвинутые China Construction, постепенно получили признание в отрасли и стали основной практикой деятельности и управления для многих строительных предприятий.

6. Стадия трансформации к высококачественному развитию. В 2014 году Министерство финансов выпустило «Уведомление по соответствующим вопросам, касающимся продвижения и применения режима сотрудничества правительства и социального капитала» и «Оперативное руководство по режиму сотрудничества правительства и социального капитала», а Национальная комиссия по развитию и реформам (NDRC) выпустила «Руководящие мнения по реализации сотрудничества правительства и социального капитала» и «Руководство по общим контрактам проектов сотрудничества правительства и социального капитала» (издание 2014 года), которые значительно облегчили применение режима Public-Private-Partnership (PPP) во всех регионах. Быстрое развитие режима PPP привели к глубоким изменениям на строительном рынке. С точки зрения темпов роста строительная отрасль перешла от высокоскоростного к стабильному росту. С точки зрения качества развития строительная отрасль достигла определенных результатов в области монтажа, экологизации, информационных технологий и т.д. и сделала шаг вперед к развитию высоких стандартов, высокого качества и высокой эффективности [2].

Результаты исследования. В XXI веке строительная отрасль Китая добилась значительных успехов. Однако нельзя отрицать, что в китайской строительной индустрии все еще существуют некоторые проблемы.

Структурная проблема. Существует слишком много крупных и средних предприятий, а доля малых и специализированных, а также мелких и усовершенствованных малых предприятий невелика, и отсутствует система промышленной структуры в форме пирамиды [3]. Соотношение особо крупных, крупных, средних и малых предприятий строительного сектора Китая составляет соответственно: 35,4 %, 27,2 %, 20,5 %, 16,9 %, тогда как в Соединенных Штатах и Японии в структуре строительной отрасли слишком мало особо крупных компаний и больших, а средних и малых предприятий, наоборот, преобладающее количество, что позволяет формировать сильную, устойчивого типа структуру промышленности типа «пирамиды», что в сравнении со строительной индустрией Китая выявляет более рационально [4].

Сотни строительных предприятий с первоклассной специализацией могут участвовать в конкуренции на уровне генерального подряда, что не соответствует их специализации, не учитывает их преимущества и недостатки, приводит к путанице и беспорядку в конкуренции на строительном рынке, усугубляет нарушения в сфере проектного подряда [5].

Проблема регулирования рынка. Одинаковый уровень ценового давления, опережающее строительство, задержки в оплате работ, «откаты» были постоянными проблемами строительной отрасли, хотя с ними энергично боролись, но единый, открытый, систематический и полный, конкурентный и упорядоченный строительный рынок еще не был создан. В настоящее время соответствующие ведомства изучают и создали первоначальный долгосрочный механизм регулирования поведения всех сторон в строительной отрасли, но в краткосрочной перспективе строительная отрасль все еще будет находиться в ситуации низкой степени регулирования рынка.

Проблема произвольного расширения масштабов проектов, приводящая к снижению качества строительства. Когда строительные компании контролируют и проверяют строительство и субподрядчиков на всех уровнях, нередки случаи передачи строительства компаниям, не имеющим соответствующей квалификации, с целью получения незаконной прибыли. Это не только влияет на экономическую политику строительного рынка, но и приводит к задержкам, потере средств и материалов, серьезно сказывается на качестве строительства, может привести к несчастным случаям и т.д. Это приводит к снижению общего уровня качества проекта.

Чрезмерная конкуренция. Основной причиной чрезмерной конкуренции в строительной отрасли является низкий уровень концентрации в отрасли, важным проявлением которого является относительная избыточность мощностей и гомогенизация продукции [6]. Поскольку большинство строительных компаний конкурируют между собой, используя схожие модели ведения бизнеса и управления, чтобы высвободить собственные производственные мощности, различные строительные компании конкурируют друг с другом, сдерживая цены и идя на порочные уступки, что неизбежно приводит к тому, что общая норма прибыли в отрасли окажется слишком низкой.

Дефицит квалифицированного персонала. Конкуренция между предприятиями — это, в конечном счете, конкуренция за таланты. Человеческие ресурсы являются наиболее творческими факторами в создании добавленной стоимости предприятия, наличие или отсутствие необходимого высококвалифицированного персонала является ключевым фактором в определении успеха предприятия. Основным препятствием для развития предприятий в текущей ситуации является нехватка высококвалифицированного персонала.

Низкая способность контролировать риски. Масштаб строительного проекта, длительный цикл, огромные инвестиции могут породить большое количество факторов риска, что приведет не только к имущественным потерям, но и повлияет на репутацию предприятия. Это требует от предприятий наличия значительного механизма предупреждения рисков и возможностей контроля над ними. Однако из-за механизма принятия решений, кредитной системы и других аспектов способность строительных предприятий Китая контролировать риски, по сравнению с развитыми странами, все еще относительно слаба.

Обсуждение и заключение. В соответствии с обозначенными выше проблемами в сфере строительства КНР предлагаются следующие меры.

Стратегия структурной оптимизации. Для преодоления нестабильной ситуации создания структуры предприятия необходимо использовать опыт Соединенных Штатов и Японии по формированию структуры строительных предприятий типа «пирамиды». Необходимо разработать программу государственной поддержки малым предприятиям строительства и дать им свободу развития, практические возможности для профессиональной подготовки, чтобы они могли быстро достичь стабильного развития.

Стратегия «Выход в свет». В настоящее время стремительное развитие экономики Китая предъявляет все более высокие требования к ресурсам, а его зависимость от внешних рынков и ресурсов возрастает. В этой ситуации реализация стратегии центрального правительства «выход в свет» и поддержка отечественных предприятий, полное использование международных и внутренних рынков и ресурсов, оптимизация распределения ресурсов и расширение пространства для развития китайской экономики имеет первостепенное значение [7].

Стратегия «Генеральный подряд». Суть генподряда заключается в повышении рентабельности за счет увеличения эффективности, поэтому он требует глубокого понимания рыночных процессов, умения управлять субподрядчиками, а также высокого уровня стандартизации для достижения эффективного контроля над производством.

Стратегия «Диверсификация». Диверсификация может увеличить источники доходов предприятий, а также эффективно избежать рисков [8].

Стратегия «Развитие предприятий за счет талантов». В связи с нехваткой работников в отрасли в целом и усилением конкуренции за таланты среди предприятий стратегия «развития предприятия за счет талантов» была включена многими предприятиями в список важных стратегий. Чтобы привлечь и удержать таланты, мно-

гие предприятия должны реформировать механизм трудоустройства и механизм стимулирования, создать благоприятные условия для сотрудников, чтобы они могли в полной мере реализовать свои таланты и стремиться к наилучшему использованию талантов, а также использовать инновационные методы распределения, оценки персонала и стимулирования. В то же время предприятия должны уделять внимание обучению талантов и стараться создавать разнообразные возможности для подготовки и обучения сотрудников.

Стратегия «Специализации». Некоторые относительно высокоприбыльные и специализированные проекты требуют от соответствующих строительных предприятий узкой специализации, например, проекты подземной проходки, большепролетные мосты и т.д. Для реализации стратегии «специализации» необходимо, чтобы предприятия делали ставку на технологические инновации, одновременно обновляя организационную структуру и механизм управления, увеличивали научные исследования и разработки в ключевых областях, стремились быстро завоевать и захватить технологические высоты в отрасли, усиливали модернизацию своих ключевых технологий, формировали основные профессиональные технологические преимущества в определенной области, осуществляли специализацию и идентификацию своих основных видов деятельности.

Начиная с 12-го пятилетнего плана Китай решительно выступает за внедрение «зеленых» технологий в строительной отрасли. Внедрение энергосберегающих технологий позволит повысить конкурентоспособность предприятий.

В современном обществе с развитием науки и техники у людей появляются новые требования к жилью, и последней тенденцией в развитии строительной отрасли Китая стало развитие технологий «умного» дома. Для достижения этой цели необходимо усилить уровень управления предприятиями, усовершенствовать каждую часть процесса строительства, каждого профессионала сделать более специализированным и лучшим, интегрировать ресурсы для усиления разработки и применения новых технологий, чтобы повысить конкурентоспособность строительной отрасли Китая в среднем и высоком сегменте рынка строительной индустрии [9].

Список литературы / References

1. Ру Бао Х., Цзидэ С. *Экономика строительства.* Издательство строительной индустрии Китая; 2020. https://books.google.ru/books?id=xLIwEAAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gbs_atb&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (дата обращения 05.04.2024).

Ru Bao Kh, Tszide S. *Construction Economics*. Beijing: Beijing Book Co. Inc.; 2020. https://books.google.ru/books?id=xLIwEAAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gbs_atb&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (accessed: 05.04.2024).

2. Гуйцин Л. Оглядываясь назад на прошедшие 70 лет, мы создадим высококачественное будущее для строительной отрасли. *Архитектура.* 2019;12–19. https://doi.org/CNKI:SUN:JANZ.0.2019-02-005

Guiqing L. Looking Back on the Past 70 Years, We will Create a High-Quality Future for the Construction Industry. *Architecture*. 2019;12–19. https://doi.org/CNKI:SUN:JANZ.0.2019-02-005

3. Цзиньфэн Л. Основные проблемы и анализ промышленной структуры строительной отрасли Китая. *Экономика строительства*. 2003;3–8. https://doi.org/CNKI:SUN:JZJJ.0.2003-08-000

Jinfeng L. Main Problems and Analysis of the Industrial Structure of the Construction Industry of China. *Construction Economics*. 2003;3–8. https://doi.org/CNKI:SUN:JZJJ.0.2003-08-000

4. Цзинчэнь Ю. Оценка эффективности прямых инвестиций китайских предприятий в строительство России. *Известия СпбГЭУ.* 2023;4:198–203. URL: https://unecon.ru/wp-content/uploads/2023/08/izvestiya-spbgeu-4-2023.pdf (дата обращения: 28.02.2024).

Yu Jingchen. Direct Investments of Chinese Enterprises in Construction in Russia: Evaluation of the Effectiveness. Izvestiya Sankt-Peterburgskogo Gosudar-stvennogo Ehkonomicheskogo Universiteta. 2023;4:198–203. URL: https://unecon.ru/wp-content/uploads/2023/08/izvestiya-spbgeu-4-2023.pdf (accessed: 28.02.2024).

5. Лентин Ч., Юнцин М. Занимая командные высоты будущего рынка — размышляя о текущей структурной перестройке строительной отрасли. *Управление строительным предприятием*. 2007;37–39. https://doi.org/CNKI:SUN:SGQY.0.2007-09-013

Lentin Ch, Yongqing M. Occupying the Managerial Heights of the Future Market — Thinking about the Current Restructuring of the Construction Indus-try. *Management of a Construction Company*. 2007;37–39. https://doi.org/CNKI:SUN:SGQY.0.2007-09-013

6. Лицинь Ч., Бои С., Цзяньшуан Ф. Исследование бизнес-структуры строительной отрасли Китая. *Экономика строительства*. 2009;8–12. https://doi.org/CNKI:SUN:JZJJ.0.2009-04-005

Liqin Ch, Boyi S, Jianshuang F. Study of the Business Structure of the Construction Industry in China. *Construction Economics*. 2009;8–12. https://doi.org/CNKI:SUN:JZJJ.0.2009-04-005

7. Сюй В. Как китайские строительные компании могут расширять зарубежные рынки. *Иностранные инвестиции в Китай*. 2024;106–108. https://doi.org/CNKI:SUN:WQZG.0.2024-01-035

Xu V. How Chinese Construction Companies can Expand Foreign Markets. *Foreign Investment in China*. 2024;106–108. https://doi.org/CNKI:SUN:WQZG.0.2024-01-035

8. Лю К. Риски и их избежание при диверсификации предприятия. *Технология и предприятие*. 2013;35. https://doi.org/10.13751/j.cnki.kjyqy.2013.18.332

Liu Kai. Risks and Their Avoidance in Enterprise Diversification Operations. *Technology and Enterprise*. 2013;35. https://doi.org/10.13751/j.cnki.kjyqy.2013.18.332

9. Жэньхуань Л. Исследование проблем развития и контрмер в области зеленых зданий в провинции Хунань в рамках программы «Двойной углерод». *Экономика строительства*. 2023;44:354–358. https://doi.org/10.14181/j.cnki.1002-851x.2023C1354

Renhuan L. Research on Development Problems and Countermeasures in the Field of Green Buildings in Hunan Province within the Framework of the “Double Carbon” Program. *Construction Economics*. 2023;44:354–358. https://doi.org/10.14181/j.cnki.1002-851x.2023C1354

Об авторах:

Шисяо У, аспирант по направлению «Технология и организация строительства» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, 1264950586@qq.com

Шеина Светлана Георгиевна, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Городское строительство и хозяйство» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ScopusID, ORCID, rgsu-gsh@mail.ru

Белаш Владимир Валентинович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Городское строительство и хозяйство» Донского государственного технического университета (344022, РФ, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162), ScopusID, ORCID, rgsu-gsh@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

У Шисяо: формирование основной концепции, методология исследования, подготовка текста, формирование выводов.

С.Г. Шеина: научное руководство, анализ результатов исследований.

В.В. Белаш: доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 12.04.2024
Поступила после рецензирования 03.05.2024
Принята к публикации 14.05.2024

About the Authors:

Wu Shixiao, PhD Student of the Major “Technology and Organization of Construction”, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, 1264950586@qq.com

Svetlana G. Sheina, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Head of the Urban Construction and Utilities Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ScopusID, ORCID, rgsu-gsh@mail.ru

Vladimir V. Belash, Cand.Sci. (Engineering**)**, Associate Professor of the Urban Construction and Utilities Department, Don State Technical University (162, Sotsialisticheskaya St., Rostov-on-Don, 344022, RF), ScopusID, ORCID, rgsu-gsh@mail.ru

Claimed Contributorship:

Wu Shixiao: formulating the main concept, research methodology, preparing the text, formulating the conclusions.

SG Sheina: scientific supervision, analysis of research results.

VV Belash: refining the text, correcting the conclusions.

Conflict of Interest Statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Received 12.04.2024
Revised 03.05.2024
Accepted 14.05.2024

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА
CONSTRUCTION MECHANICS

CC BY

Check for updates

Оригинальное эмпирическое исследование

УДК 624.04
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-2-50-58

Определение температурных напряжений при возведении монолитных толстостенных цилиндрических оболочек

Д.А. Зоалкфл ✉, **В.С. Тюрина**, **А.С. Чепурненко**
Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ danialzoalkfl@mail.ru

EDN: XZJAPI

Аннотация

Введение. Толстостенные цилиндрические оболочки широко используются в гидротехнических сооружениях, защитных конструкциях реакторов АЭС, пусковых установках ракетных комплексов. В массивных монолитных конструкциях вследствие внутреннего тепловыделения бетона высок риск раннего трещинообразования. Для разработки мероприятий по его предотвращению могут быть применены методы компьютерного моделирования. Ранее моделирование температурных напряжений в процессе возведения выполнялось для массивных фундаментных плит и стен, однако толстостенные цилиндрические оболочки не рассматривались. Целью работы выступает разработка методики расчета температурных напряжений при возведении монолитных толстостенных цилиндрических оболочек.

Материалы и методы. Расчет напряжений выполняется в одномерной осесимметричной постановке. Учитывается зависимость механических характеристик бетона от степени его зрелости. Задача расчета напряженно-деформированного состояния (далее — НДС) сводится к дифференциальному уравнению второго порядка относительно радиального напряжения, которое решается численно методом конечных разностей. Расчету НДС предшествует расчет температурного поля, которое считается не зависящим от напряженного состояния. Численное решение реализовано авторами в среде MATLAB.

Результаты исследования. Первым этапом для апробации разработанной методики выполнено сравнение с расчетом в программном комплексе ANSYS при постоянном во времени модуле упругости бетона, которое подтвердило ее достоверность. Также приведены результаты расчета с учетом зависимости модуля упругости бетона от степени его зрелости. При этом, по сравнению с расчетом при постоянных во времени механических характеристиках бетона, картина напряженно-деформированного состояния кардинально меняется.

Обсуждение и заключение. Расчет с постоянным во времени модулем упругости бетона в стандартных программных комплексах по сравнению с авторской методикой приводит к завышенным значениям окружных напряжений, а также не позволяет вычислить остаточные напряжения. В случае постоянного во времени модуля упругости бетона температурные напряжения являются полностью обратимыми.

Ключевые слова: температурные напряжения, раннее трещинообразование, массивные железобетонные конструкции, внутреннее тепловыделение, численное моделирование.

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Зоалкфл Д.А., Тюрина В.С., Чепурненко А.С. Определение температурных напряжений при возведении монолитных толстостенных цилиндрических оболочек. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(2):50–58. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-2-50-58

© Зоалкфл Д.А., Тюрина В.С., Чепурненко А.С., 2024

Original Empirical Research

Determination of Temperature Stresses during Construction of the Monolithic Thick-Walled Cylindrical Shells

Danial A. Zoalkfl ✉, Vasilina S. Turina, Anton S. Chepurnenko
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ danialzoalkfl@mail.ru

Abstract

Introduction. The thick-walled cylindrical shells are widely used in the hydraulic structures, protective structures of nuclear power plant reactors and missile system launchers. Due to the internal heat emission of concrete in massive monolithic structures, there is a high risk of early-age cracking. Computer modeling methods can be used to develop the preventive measures against it. Previously, modeling of temperature stresses within a construction process was carried out for the massive foundation slabs and walls, whereas the thick-walled cylindrical shells were not studied. The aim of the present work is to develop a methodology for calculating the temperature stresses during construction of the monolithic thick-walled cylindrical shells.

Materials and Methods. Stress calculations were made in a one-dimensional axisymmetric formulation. The dependence of the mechanical properties of concrete on the degree of its maturity was taken into account. The stress-strain state (hereinafter — SSS) calculation problem was reduced to a second-order differential equation relative to the radial stress, which was solved numerically by a finite difference method. The SSS calculation was preceded by the temperature field calculation, which was deemed independent from the stress state. The authors carried out the numerical solution in the MATLAB environment.

Results. At the first stage of testing, the developed methodology was compared with calculations made in the ANSYS software package under a time-constant modulus of elasticity of concrete that confirmed its reliability. Also, the calculation results, which took into account the dependence of the modulus of elasticity of concrete on degree of its maturity were presented. Moreover, compared to calculations under the time-constant mechanical properties of concrete, in the stress-strain state, the picture became radically different.

Discussion and Conclusion. Calculations under a time-constant modulus of elasticity of concrete by means of the standard software packages, as opposed to the author's methodology, leads to the overestimated circumferential stress values, and hinders calculation of the residual stresses. In the case of a time-constant modulus of elasticity of concrete, the temperature stresses are completely reversible.

Keywords: temperature stresses, early-age cracking, massive reinforced concrete structures, internal heat emission, numerical modeling

Acknowledgement. The authors express their gratitude to the editorial office and reviewers for their attentive attitude to the article and the comments provided, which enabled improvement of the article quality.

For citation. Zoalkfl DA, Tyurina VS, Chepurnenko AS. Determination of Temperature Stresses during Construction of the Monolithic Thick-Walled Cylindrical Shells. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024;3(2):50–58. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-2-50-58

Введение. Толстостенные цилиндрические оболочки широко применяются в строительстве, включая такие ответственные объекты, как гидротехнические сооружения [1], конструкции сухих защит реакторов АЭС [2], пусковые установки ракетных комплексов [3] и др. Такие конструкции должны удовлетворять повышенным требованиям по трещиностойкости, и образование в них трещин в процессе возведения не допускается.

Вследствие массивности указанных конструкций требуются специальные технологические решения для предотвращения раннего трещинообразования в процессе возведения, к которым относится устройство систем охлаждения [4], регулирование параметров теплообмена на поверхностях [5], контроль темпов бетонирования [6], а также выбор правильных рецептур бетонных смесей [7]. В качестве одного из путей подбора эффективных технологических решений может выступать компьютерное моделирование [8].

Моделированию температурных полей и напряжений при возведении массивных монолитных конструкций посвящено множество работ, включая [9–11] и др. Большинство публикаций по данной проблеме, в том числе и перечисленные выше, относится к массивным монолитным фундаментным плитам и стенам. Для толстостенных цилиндрических оболочек такая задача ранее не решалась.

Целью настоящей работы выступает разработка методики расчета температурных напряжений при возведении толстостенных цилиндрических оболочек в одномерной осесимметричной постановке.

Материалы и методы. При расчете толстостенных цилиндрических оболочек в одномерной осесимметричной постановке как правило рассматривают 2 случая: плоское напряженное состояние (далее — ПНС) и плоское деформированное состояние (далее — ПДС). Первый случай имеет место для коротких цилиндров, а второй — для достаточно длинных. В обоих случаях при наличии вынужденных деформаций, к которым относятся температурные деформации и деформации усадки, задача расчета радиально неоднородного цилиндра может быть сведена к дифференциальному уравнению второго порядка относительно радиального напряжения σ_r [12]:

$$\frac{d^2\sigma_r}{dr^2} + \varphi(r)\frac{d\sigma_r}{dr} + \psi(r)\sigma_r = f(r). \tag{1}$$

Функции $\varphi(r)$, $\psi(r)$, и $f(r)$ в случае плоской деформации определяются по формулам:

$$\varphi(r) = \frac{3}{r} - \frac{1}{E}\cdot\frac{dE}{dr} - \frac{2\nu}{1-\nu^2}\cdot\frac{d\nu}{dr};$$

$$\psi(r) = -\frac{1}{r}\left[\frac{1-2\nu}{1-\nu}\cdot\frac{dE}{dr}\cdot\frac{1}{E} + \frac{(1+4\nu)}{1-\nu^2}\cdot\frac{d\nu}{dr}\right]; \tag{2}$$

$$f(r) = -\frac{E}{r(1-\nu^2)}\left(\frac{d\varepsilon_в}{dr}(1+\nu) + \frac{d\nu}{dr}\varepsilon_в\right),$$

где E — модуль упругости бетона; ν — коэффициент Пуассона бетона; $\varepsilon_в = \varepsilon_{sh} + \alpha\Delta T$; ε_{sh} — деформация усадки, α — коэффициент линейного температурного расширения, ΔT — изменение температуры.

В случае плоского напряженного состояния функции $\varphi(r)$, $\psi(r)$, и $f(r)$ имеют вид:

$$\varphi(r) = \frac{3}{r} - \frac{1}{E}\cdot\frac{dE}{dr};$$

$$\psi(r) = -\frac{1}{r}\left[\frac{d\nu}{dr} + (1-\nu)\cdot\frac{1}{E}\cdot\frac{dE}{dr}\right]; \tag{3}$$

$$f(r) = -\frac{E}{r}\cdot\frac{d\varepsilon_в}{dr}.$$

Радиальные и окружные напряжения в плоской осесимметричной задаче связаны соотношением:

$$\sigma_\theta = r\frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r. \tag{4}$$

Напряжения σ_z в случае плоского деформированного состояния определяются по формуле:

$$\sigma_z = -E\varepsilon_в + \nu(\sigma_\theta + \sigma_r). \tag{5}$$

Изменение коэффициента Пуассона в зависимости от r и t нами не учитывалось по причине отсутствия каких-либо экспериментальных данных, указывающих на это. Поскольку модуль упругости бетона в рассматриваемой нами задаче является функцией времени, уравнение (1) следует записать в приращениях:

$$\frac{d^2(\Delta\sigma_r)}{dr^2} + \varphi(r)\frac{d(\Delta\sigma_r)}{dr} + \psi(r)\Delta\sigma_r = \Delta f(r), \tag{6}$$

где $\Delta f(r) = -\frac{E}{r(1-\nu^2)}\cdot\frac{1}{E}\cdot\frac{d(\Delta\varepsilon_в)}{dr}\cdot(1+\nu)$ для ПДС, $\Delta f(r) = -\frac{E}{r}\cdot\frac{d(\Delta\varepsilon_в)}{dr}$ для ПНС.

Функции $\varphi(r)$ и $\psi(r)$ в уравнении (6) определяются по формулам (2) и (3) в зависимости от вида напряженного состояния. Приращения напряжений σ_θ вычисляются по формуле:

$$\Delta\sigma_\theta = r\frac{d(\Delta\sigma_r)}{dr} + \Delta\sigma_r. \tag{7}$$

https://www.stsg-donstu.ru

Для плоской деформации приращения напряжения σ_z вычисляются по формуле:

$$\Delta\sigma_z = -E\Delta\varepsilon_в + \nu\left(\Delta\sigma_\theta + \Delta\sigma_r\right). \tag{8}$$

Граничные условия для уравнения (6) имеют вид:

$$\Delta\sigma_r\left(a\right) = \Delta\sigma_r\left(b\right) = 0. \tag{9}$$

При решении уравнения (6) методом конечных разностей его аппроксимация для *i*–го узла принимает вид:

$$\frac{\Delta\sigma_{r,i+1} - 2\Delta\sigma_{r,i} + \Delta\sigma_{r,i-1}}{\Delta r^2} + \varphi\left(r_i\right)\cdot\frac{\Delta\sigma_{r,i+1} - \Delta\sigma_{r,i-1}}{2\Delta r} + \psi\left(r_i\right)\Delta\sigma_{r,i} == \Delta f\left(r_i\right). \tag{10}$$

После нахождения приращений напряжений $\Delta\sigma_r$ приращения напряжений $\Delta\sigma_\theta$ для внутренних узлов сетки определяются по формуле:

$$\Delta\sigma_{\theta,i} = r_i\frac{\Delta\sigma_{r,i+1} - \Delta\sigma_{r,i-1}}{2\Delta r} + \Delta\sigma_{r,i}. \tag{11}$$

Для узлов при $r=a$ и $r=b$ и при определении величин $\Delta\sigma_\theta$ также используется разностный шаблон второго порядка точности:

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_\theta\big|_{r=a} &= \frac{a}{2\Delta r}\left(-3\Delta\sigma_{r,1} + 4\Delta\sigma_{r,2} - \Delta\sigma_{r,3}\right) + \Delta\sigma_{r,1};\\ \Delta\sigma_\theta\big|_{r=b} &= \frac{b}{2\Delta r}\left(3\Delta\sigma_{r,nr+1} - 4\Delta\sigma_{r,nr} + \Delta\sigma_{r,nr-1}\right) + \Delta\sigma_{r,nr+1}.\end{aligned} \tag{12}$$

Дифференцирование функции *E(r)* выполняется численно.

Задачи определения температурных полей и напряженно-деформированного состояния решаются несвязно. Расчет напряжений во временной области выполняется после определения температурного поля пошагово. Температурное поле определяется по методике, приведенной в [13]. После определения приращений напряжений на каждом шаге они суммируются с напряжениями с предыдущего шага.

Данные для расчета температурного поля были приняты такие же, как в работе [13]: плотность бетона ρ=2 500 кг/м^3, удельная теплоемкость c=1 000 Дж/(кг×К), коэффициенты теплоотдачи на внутренней и внешней поверхности $h_a=h_b$=10 Вт/(м^2×К), температура среды и начальная температура бетонной смеси T_0=20 °С, внутренний радиус цилиндра a=1,5 м, внешний радиус b=2,38 м, коэффициент теплопроводности бетона λ=2,67 Вт/(м×К).

Функция изменения во времени количества теплоты, выделяемого 1 м^3 бетона в процессе твердения, принималась в соответствии с [13]:

$$Q\left(t\right) = Q_{28}\cdot\exp\left[k\cdot\left(1-\left(\frac{28}{t}\right)^x\right)\right], \tag{13}$$

где t — время, сут.

Расчет выполнялся при Q_{28}=130 МДж/м^3, k=0,13, x=0,42.

Предел прочности бетона при сжатии R в момент времени t определялся по эмпирической формуле [14]:

$$\frac{R}{R_{28}} = \exp\left(0{,}35\left[1-\left(\frac{15800 - 122{,}5\overline{T}}{\overline{T}t}\right)^{0{,}55}\right]\right), \tag{14}$$

где R_{28} — прочность бетона в возрасте 28 суток, $\overline{T} = ЗБ / t$; t — возраст бетона, час., $ЗБ$ — степень зрелости бетона, определяемая интегралом:

$$ЗБ(t) = \int_0^t T(\tau)dt\,. \tag{15}$$

Модуль упругости бетона выражался через его прочность при сжатии по эмпирической формуле [15]:

$$E(R) = 1000\frac{0,04R + 57}{1+\frac{29}{3,8+0,8R}}, \text{ Мпа.} \tag{16}$$

Значения R в формулу (16) следует подставлять в МПа. Под E здесь понимается начальный модуль упругости бетона при уровне напряжений, не превышающем 0,3–0,4R, т.е. физическая нелинейность бетона не рассматривалась.

Формула (15) дает приемлемые результаты при возрасте бетона не менее 1 суток. При t=0 прочность при сжатии на основе формулы (15) будет равна нулю, но модуль упругости окажется не равным нулю, что не очень удобно, и может привести к завышенным напряжениям на начальной стадии набора прочности. Поэтому при $t \le 24$ ч зависимость модуля упругости от времени представлялась уравнением вида:

$$E(t) = E_{24} \cdot \exp\left(1,348\left[1-\left(\frac{24}{t}\right)^{1,438}\right]\right), \tag{17}$$

где t — время, час.; E_{24} — модуль упругости бетона после 1 суток твердения, вычисленный на основе формул (14)–(16) с учетом времени и температуры твердения.

Усадка бетона представлялась явной функцией от времени на основе данных [16]:

$$\varepsilon_{sh}(t) = -(0,2B-2)(a\ln t - b)\cdot 10^{-5} \le 0, \tag{18}$$

где B — класс бетона, МПа; a = 0,31 и b = 0,4 — эмпирические коэффициенты.

Результаты исследования. Первым этапом для контроля достоверности результатов был выполнен расчет толстостенной цилиндрической оболочки при постоянном во времени модуле упругости бетона $E = 3\times10^4$ МПа с последующим сравнением решения с программным комплексом ANSYS. Остальные характеристики бетона, необходимые для расчета: коэффициент Пуассона ν=0,2, коэффициент линейного температурного расширения $\alpha = 10^{-5}$ 1/°C.

На рис. 1 приведены графики изменения во времени максимальной температуры в цилиндре, а также температур у внутренней и внешней поверхности. Результаты расчета температурного поля совпали с решением в ANSYS.

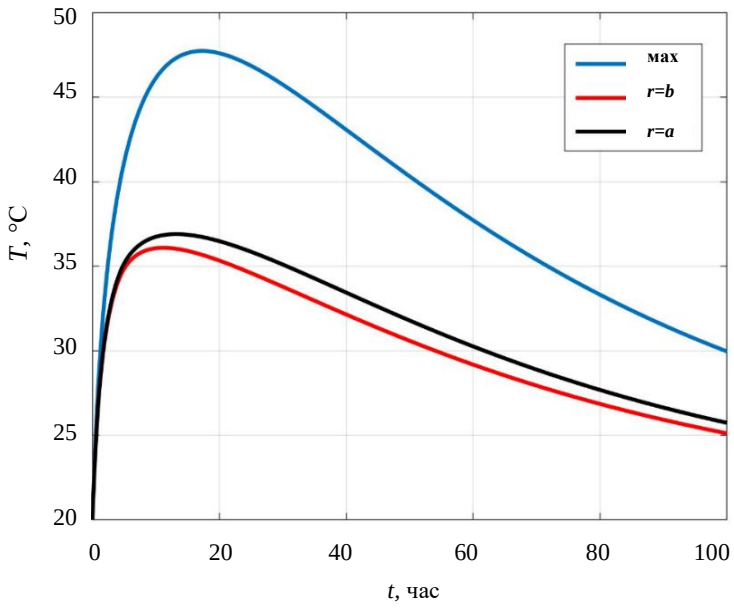


Рис. 1. Изменение во времени температур на поверхностях и в толще конструкции

При расчете напряженно-деформированного состояния нами рассматривался случай плоской деформации. При моделировании напряженно-деформированного состояния в ANSYS на верхнем и нижнем торце цилиндра (грани A и B по рис. 2) устанавливались закрепления от перемещений по вертикальной оси для создания условий ПДС.

https://www.stsg-donstu.ru

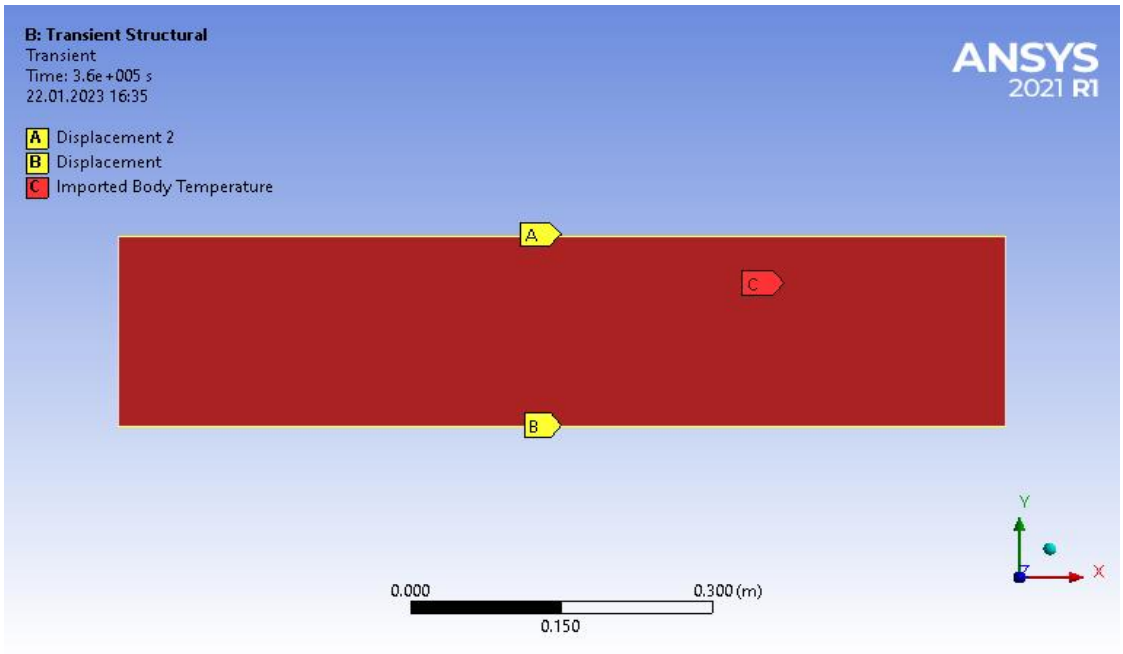


Рис. 2. Граничные условия в ANSYS

На рис. 3 приведены графики изменения во времени напряжений σ_θ у внешней поверхности, полученные путем расчета по авторской методике и в ANSYS. Расхождение результатов незначительное. При постоянном во времени модуле упругости температурные напряжения полностью обратимы. Из рис. 3 видно, что при расчете с постоянным во времени модулем упругости $E = 3 \cdot 10^4$ МПа растягивающие напряжения могут достигать 3 МПа и более, что превышает прочность бетона на растяжение.

При расчете с учетом зависимости физико-механических характеристик от степени зрелости класс бетона принимался равным В25 (прочность при сжатии в возрасте 28 сут R_{28} = 37 МПа).

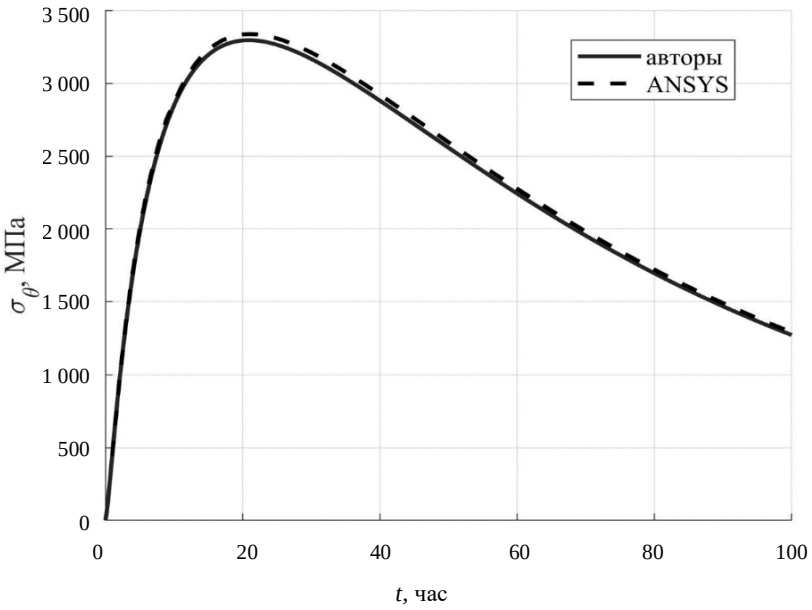


Рис. 3. Изменение во времени напряжений σ_θ у внешней поверхности цилиндра при постоянном модуле упругости

В случае учета зависимости модуля упругости от времени по формулам (14)–(17) картина напряженно-деформированного состояния меняется кардинально. На рис. 4 приведены графики изменения окружных напряжений у внутренней и внешней поверхности, а также в середине толщи во времени. Из рис. 4 видно, что на начальном этапе у внутренней и внешней поверхности возникают небольшие растягивающие напряжения, но затем знак напряжений меняется, и в конечном итоге при $r=a$ и $r=b$ остаточные напряжения сжимающие, а в середине толщи — растягивающие.

На рис. 4 показан также график изменения во времени текущей прочности бетона на растяжение R_t в середине толщи. Для рассмотренного примера при учете зависимости физико-механических характеристик бетона от времени окружные напряжения не превышают прочность материала на растяжение.

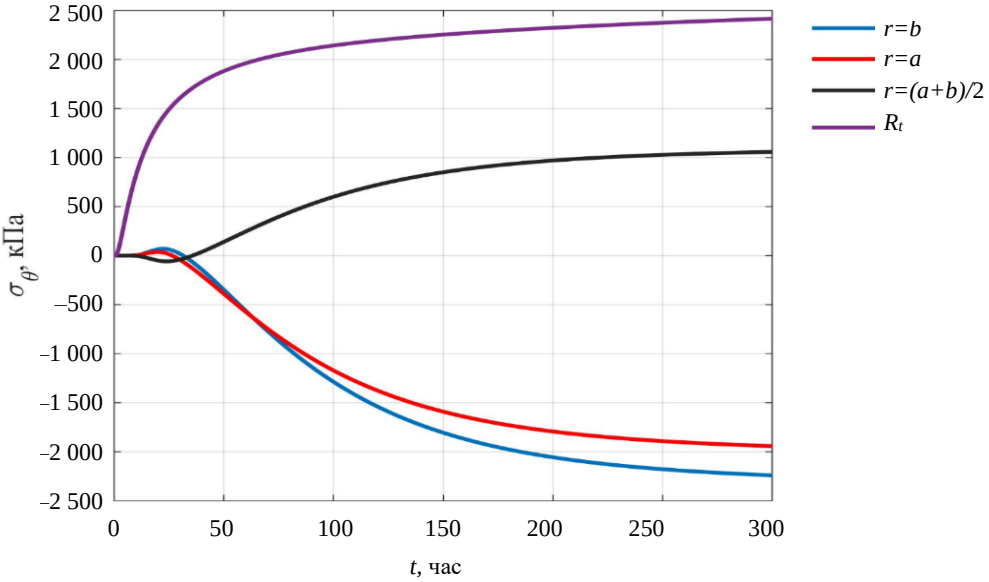


Рис. 4. Изменение во времени окружных напряжений с учетом зависимости модуля упругости бетона от степени его зрелости

Усадка бетона на величину радиальных и окружных напряжений не влияет, поскольку она постоянна по объему тела, а в дифференциальном уравнении (6) фигурирует не сама вынужденная деформация, а ее производная по радиусу, которая для деформаций усадки обращается в ноль. В то же время деформации усадки оказывают влияние на величину напряжений σ_z. Графики изменения во времени напряжений σ_z для случая ПДС без учета и с учетом усадки бетона приведены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что напряжения σ_z могут существенно превышать прочность бетона на растяжение. Однако представленное решение справедливо только для бесконечно длинного цилиндра, а для цилиндра конечной длины истинные значения напряжения σ_z можно определить только путем моделирования в двумерной постановке. При учете контракционной усадки напряжения σ_z несколько снижаются. Это можно объяснить тем, что усадочные деформации частично компенсируют деформации температурного расширения.

Радиальные напряжения в рассмотренной задаче малы по сравнению с напряжениями σ_θ и σ_z.

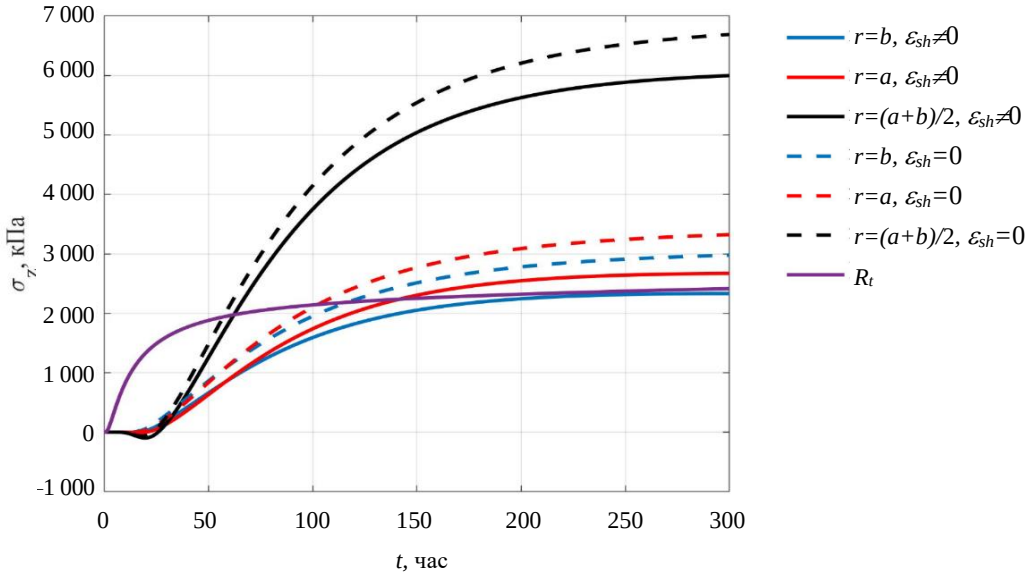


Рис. 5. Изменение во времени напряжений σ_z

https://www.stsg-donstu.ru

Обсуждение и заключение. Разработана методика определения напряженно-деформированного состояния при возведении толстостенных цилиндрических оболочек на основе метода конечных разностей в одномерной осесимметричной постановке (плоское напряженное состояние и плоское деформированное состояние) с учетом неоднородности, вызванной зависимостью механических характеристик бетона от степени его зрелости.

Для подтверждения достоверности результатов выполнено сравнение с решением в программном комплексе ANSYS при постоянном во времени и по радиусу модуле упругости бетона. Установлено, что при учете зависимости модуля упругости бетона от времени картина напряженно-деформированного состояния меняется кардинально, и в конструкции после полного остывания имеют место остаточные напряжения. Расчет с постоянным во времени модулем упругости бетона в стандартных программных комплексах приводит к завышенным значениям окружных напряжений.

Перспективой дальнейших исследований является анализ напряженно-деформированного состояния толстостенных цилиндрических оболочек в двумерной осесимметричной постановке для корректного учета напряжений σ_z.

Список литературы / References

1. Hassanli R,Youssf O, Manalo A., Najafgholipour M.A, Elchalakani M., Castillo ER, et al. An Experimental Study of the Behavior of GFRP-Reinforced Precast Concrete Culverts. *Journal of Composites for Construction*. 2022;26(5):04022043. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001224

2. Дорф В.А., Пергаменщик Б.К. Совершенствование технологии устройства сухой защиты шахты реактора АЭС. *Вестник МГСУ*. 2021;16(4):506–512. https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.4.506-512

Dorf VA, Pergamenchik BK. Updating of Dry Shielding of Nuclear Power Plant Reactor Vessel. *Vestnik MGSU*. 2022;26(5):04022043. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001224 (In Russ.).

3. Singh L, Ravaliya NR, Akbar MA. Analysis of Reinforced Concrete Structures for Accidental Blast during Launching of a Rocket. *INCAS Bulletin*. 2021;13(3):195–204. https://doi.org/10.13111/2066-8201.2021.13.3.16

4. Alamayreh MI, Alahmer A, Younes MB, Bazlamit SM. Pre-Cooling Concrete System in Massive Concrete Production: Energy Analysis and Refrigerant Replacement. *Energies*. 2022;15(3):1129. https://doi.org/10.3390/en15031129

5. Aniskin NA, Chuc NT, Khanh PK. The Use of Surface Thermal Insulation to Regulate the Temperature Regime of a Mass Concrete During Construction. *Power Technology and Engineering*. 2021;55:1–7. https://doi.org/10.1007/s10749-021-01310-6

6. Smolana A, Klemczak B, Azenha M, Schlike D. Early Age Cracking Risk in a Massive Concrete Foundation Slab: Comparison of Analytical and Numerical Prediction Models with On-Site Measurements. *Construction and Building Materials*. 2021;301:124135. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124135

7. Liu J, Tian Q, Wang Y, Li H, Xu W. Evaluation Method and Mitigation Strategies for Shrinkage Cracking of Modern Concrete. *Engineering*. 2021;7(3):348–357. https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.01.006

8. Zheng Z, Wei X. Mesoscopic Models and Numerical Simulations of the Temperature Field and Hydration Degree in Early-Age Concrete. *Construction and Building Materials*. 2021;266:121001. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121001

9. Klemczak B, Żmij A. Insight into Thermal Stress Distribution and Required Reinforcement Reducing Early-Age Cracking in Mass Foundation Slabs. *Materials*. 2021;14(3):477. https://doi.org/10.3390/ma14030477

10. Smolana A., Klemczak B., Azenha M., Schlike D. Experiences and Analysis of the Construction Process of Mass Foundation Slabs Aimed at Reducing the Risk of Early Age Cracks. *Journal of Building Engineering*. 2021;44:102947. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102947

11. Kheir J, Klausen A, Hammer TA, De Meyst L, Hilloulin B, Van Tittelboom K, et al. Early Age Autogenous Shrinkage Cracking Risk of an Ultra-High Performance Concrete (UHPC) Wall: Modelling and Experimental Results. *Engineering Fracture Mechanics*. 2021;257:108024. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.108024

12. Chepurnenko A, Litvinov S, Meskhi B, Beskopylny A. Optimization of Thick-Walled Viscoelastic Hollow Polymer Cylinders by Artificial Heterogeneity Creation: Theoretical Aspects. *Polymers*. 2021;13(15):2408. https://doi.org/10.3390/polym13152408

13. Зоалкфл Д.А., Курачев Р.М., Чепурненко А.С. Определение температурных полей при возведении монолитных толстостенных цилиндрических оболочек. *Вестник Евразийской науки*. 2023;15(2):80SAVN223. URL: https://esj.today/PDF/80SAVN223.pdf (дата обращения: 1.04.2024).

Zoalkfl DA, Kurachev RM, Chepurnenko AS. Determination of Temperature Fields During the Construction of Monolithic Thick-Walled Cylindrical Shells. The *Eurasian Scientific Journal*. 2023;15(2):80SAVN223. URL: https://esj.today/PDF/80SAVN223.pdf (accessed: 1.04.2024). (In Russ.).

14. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И. Прогноз кинетики прочности бетона при твердении в условиях, отличных от нормальных. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2023;2(4):59–68. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-59-68

Nesvetaev GV, Koryanova YuI. Forecasting the Strength Gaining Kinetics of the Concrete Hardening in the Abnormal Conditions. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2023;2(4):59–68. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-59-68

15. Маилян Д.Р., Несветаев Г.В. Регулирование жесткости и прочности железобетонных балок варьированием модуля упругости бетона. *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2018;20(4):86–93. https://doi.org/10.31675/1607-1859-2018-20-4-86-93

Mailyan DR, Nesvetaev GV. Rigidity and Strength Analysis of Reinforced Concrete Beams by Varying Elasticity Modulus. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2018;(4):86–93. https://doi.org/10.31675/1607-1859-2018-20-4-86-93 (In Russ.).

16. Nesvetaev G, Koryanova Y, Zhilnikova T. On Effect of Superplasticizers and Mineral Additives on Shrinkage of Hardened Cement Paste and Concrete. *MATEC Web of Conferences*. 2018;196:04018. https://doi.org/10.1051/matecconf/201819604018

Об авторах:

Зоалкфл Даниаль Аммарович, аспирант кафедры «Строительная механика и теория сооружений» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, danialzoalkfl@mail.ru

Тюрина Василина Сергеевна, старший преподаватель кафедры «Строительная механика и теория сооружений» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ScopusID, ORCID, vasilina.93@mail.ru

Чепурненко Антон Сергеевич, профессор кафедры «Строительная механика и теория сооружений» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, доцент, ResearcherID, ScopusID, ORCID, anton_chepurnenk@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Д.А. Зоалкфл: проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов;
В.С. Тюрина: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, анализ результатов исследований;
А.С. Чепурненко: научное руководство, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

Поступила в редакцию 12.04.2024
Поступила после рецензирования 03.05.2024
Принята к публикации 14.05.2024

About the Authors:

Danial A. Zoalkfl, PhD Student of the Structural Mechanics and Theory of Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, danialzoalkfl@mail.ru

Vasilina S. Turina, Cand.Sci. (Engineering), Senior Lecturer of the Structural Mechanics and Theory of Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ScopusID, ORCID, vasilina.93@mail.ru

Anton S. Chepurnenko, Dr.Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Structural Mechanics and Theory of Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ResearcherID, ScopusID, ORCID, anton_chepurnenk@mail.ru

Claimed Contributorship:

Zoalkfl DA: carrying out calculations, preparing the text, formulating the conclusions.
Turina VS: formulating the main concept, aims and objectives of the study, analysis of the research results.
Chepurnenko AS: scientific supervision, refining the text, correcting the conclusions.

Conflict of Interest Statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Received 12.04.2024
Revised 03.05.2024
Accepted 14.05.2024

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА
CONSTRUCTION MECHANICS

CC BY

Check for updates

Оригинальное эмпирическое исследование

УДК 624.04
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-2-50-58

Определение температурных напряжений при возведении монолитных толстостенных цилиндрических оболочек

Д.А. Зоалкфл ✉, В.С. Тюрина, А.С. Чепурненко
Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ danialzoalkfl@mail.ru

EDN: XZJAPI

Аннотация

Введение. Толстостенные цилиндрические оболочки широко используются в гидротехнических сооружениях, защитных конструкциях реакторов АЭС, пусковых установках ракетных комплексов. В массивных монолитных конструкциях вследствие внутреннего тепловыделения бетона высок риск раннего трещинообразования. Для разработки мероприятий по его предотвращению могут быть применены методы компьютерного моделирования. Ранее моделирование температурных напряжений в процессе возведения выполнялось для массивных фундаментных плит и стен, однако толстостенные цилиндрические оболочки не рассматривались. Целью работы выступает разработка методики расчета температурных напряжений при возведении монолитных толстостенных цилиндрических оболочек.

Материалы и методы. Расчет напряжений выполняется в одномерной осесимметричной постановке. Учитывается зависимость механических характеристик бетона от степени его зрелости. Задача расчета напряженно-деформированного состояния (далее — НДС) сводится к дифференциальному уравнению второго порядка относительно радиального напряжения, которое решается численно методом конечных разностей. Расчету НДС предшествует расчет температурного поля, которое считается не зависящим от напряженного состояния. Численное решение реализовано авторами в среде MATLAB.

Результаты исследования. Первым этапом для апробации разработанной методики выполнено сравнение с расчетом в программном комплексе ANSYS при постоянном во времени модуле упругости бетона, которое подтвердило ее достоверность. Также приведены результаты расчета с учетом зависимости модуля упругости бетона от степени его зрелости. При этом, по сравнению с расчетом при постоянных во времени механических характеристиках бетона, картина напряженно-деформированного состояния кардинально меняется.

Обсуждение и заключение. Расчет с постоянным во времени модулем упругости бетона в стандартных программных комплексах по сравнению с авторской методикой приводит к завышенным значениям окружных напряжений, а также не позволяет вычислить остаточные напряжения. В случае постоянного во времени модуля упругости бетона температурные напряжения являются полностью обратимыми.

Ключевые слова: температурные напряжения, раннее трещинообразование, массивные железобетонные конструкции, внутреннее тепловыделение, численное моделирование.

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Зоалкфл Д.А., Тюрина В.С., Чепурненко А.С. Определение температурных напряжений при возведении монолитных толстостенных цилиндрических оболочек. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(2):50–58. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-2-50-58

© Зоалкфл Д.А., Тюрина В.С., Чепурненко А.С., 2024